

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Termovizní měření vodíkových palivových článků
Thermovision measurement of hydrogen fuel cells

Zadání bakalářské práce

Student: **Radek Vaněk**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika
Téma: Termovizní měření vodíkových palivových článků
Thermovision measurement of hydrogen fuel cells

Zásady pro vypracování:

1. Teorie přenosu tepla zařízením
2. Princip nízкотеплотních vodíkových palivových článků typu PEM
3. Měření PEM palivových článků termokamerou
4. Vyhodnocení naměřených dat

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Srinivasan, S.: Fuel cells : from fundamentals to applications, New York, 2006.
2. Kordes, K., Simader, G.: Fuel cells and their applications, Weinheim, 1996.
3. Sokanský, K.: Palivové články v energetice, Ostrava, 2007.
4. Uživatelský manuál k termokameře Flir systems: ThermalCAM™ E45, 2006.
5. Hrabčík, M., Goňo, R.: Thermodiagnostic problems and use cameras Flir E45 and Fluke Ti20, Sborník konference EPE 2009, Kouty nad Desnou, 2009.
6. Hrabčík, M., Goňo, R.: Issues of Dead-end clamps, Sborník konference EPE 2011, Kouty nad Desnou, 2011.
7. Pyško, P.: Palivové články – laboratorní měření, Bakalářská práce, Ostrava, 2009.
8. Mrozek, D.: Návrh komplexního řešení palivového hospodářství (H₂), pro palivový článek typu PEMFC o výkonu 5 kW (resp. 5 x 1 kW) v laboratoři VŠB-TUO, Bakalářská práce, Ostrava, 2005.
9. Sevjidsuren, G.: Exergy Analysis of 1.2 kW Nexa™ Fuel Cell Module, online:
<<http://www.intechopen.com/books/clean-energy-for-better-environment/exergy-analysis-of-1-2-kw->

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Moldřík, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 7. 5. 2014



Podpis studenta

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Petru Moldříkovi, Ph.D. za jeho vedení a rady při tvorbě této bakalářské práce.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá měřením teplot palivového článku pomocí termokamery. V první kapitole jsou popsány obecné principy přenosu tepla a termovizního měření. Druhá kapitola se zabývá principem funkce palivových článků typu PEM, jeho vlastnostmi a také použitím v praxi. Následující kapitola je zaměřena na samotné měření modulu nízkoteplotních palivových článků Nexa v laboratoři palivových článků VŠB – TUO. V poslední kapitole jsou graficky znázorněna a vyhodnocena naměřená data.

Klíčová slova

nízkoteplotní, Nexa, palivový článek, PEM, termovize, termokamera

Abstract

This bachelor's thesis deals with temperature measurement of fuel cells using the thermal camera. The first chapter describes general principles of heat transfer and thermovision measurement. The second chapter is about working principles, characteristics and applications of PEM fuel cells. The next chapter is focused on the measurement of low temperature fuel cell Nexa module in the fuel cell laboratory of VŠB – TUO. The last chapter includes a graphical representation and the evaluation of measurement data

Keywords

low temperature, Nexa, fuel cell, PEM, termography, thermal camera

Obsah

Úvod.....	1
1 Principy termografie.....	2
1.1 Teorie přenosu tepla.....	2
1.1.1 Přenos tepla vedením	2
1.1.2 Přenos tepla prouděním.....	3
1.1.3 Přenos tepla sáláním.....	4
1.2 Termovizní měření	7
1.2.1 Konstrukce termokamery	7
1.2.2 Přesnost měření	8
1.2.3 Použití termovizního měření	9
2 Princip nízkoteplotních palivových článků typu PEM.....	10
2.1 Typy palivových článků.....	10
2.2 Konstrukce palivových článků typu PEM.....	11
2.2.1 Membránové uskupení	12
2.2.2 Desky s kanálky pro rozvod reakčních plynů	12
2.2.3 Těsnění	13
2.2.4 Chladicí okruh.....	13
2.2.5 Koncové desky s elektrodami.....	13
2.2.6 Soubor palivových článků.....	13
2.3 Princip funkce palivového článku typu PEM.....	13
2.4 Základní parametry palivových článků	14
2.4.1 Napětí palivového článku.....	14
2.4.2 Účinnost palivového článku	16
2.4.3 Výkon palivového článku.....	17
2.5 Vlastnosti PEMFC.....	17
2.6 Použití PEMFC	18
2.6.1 Doprava	18
2.6.2 Stacionární aplikace	19
2.6.3 Přenosné aplikace	20
3 Měření PEM palivových článků termokamerou	21
3.1 Laboratoř palivových článků.....	21

3.2	Nexa Power Module.....	21
3.3	Průběh měření	23
4	Vyhodnocení naměřených dat.....	25
4.1	Měření při rostoucím zatížení	25
4.2	Měření při zatížení 1000 W.....	28
4.3	Měření při zatížení 100 W s vypnutým chlazením.....	31
4.4	Měření při zatížení 300 W.....	32
4.5	Měření při zatížení 300 W s vypnutým chlazením.....	33
4.6	Porovnání hodnot u konstantního zatížení	34
	Závěr	35
	Seznam použité literatury.....	36
	Seznam grafů.....	38
	Seznam obrázků	39
	Seznam tabulek	40
	Seznam příloh.....	41

Úvod

Celosvětové zásoby fosilních paliv jsou omezené, a proto se lidstvo snaží hledat alternativní zdroje elektrické energie. Palivové články jsou jednou z těchto alternativních technologií, přestože je jejich princip znám už od 19. století, dosud nedošlo k jejich masovému využití. Do budoucnosti se ovšem počítá s tím, že by mohly nahradit různé zdroje elektrické energie spalující fosilní paliva různých výkonů, dokonce až po velké elektrárenské zdroje, a to především díky jejich nízkým emisím, vysoké účinnosti a nízkým nárokům na údržbu.

Tato bakalářská práce se technologií palivových článků zabývá a zaměřuje se především na jejich nízkoteplotní variantu PEM, jejichž palivem je čistý vodík. V teoretické části práce je rozebrán princip jejich funkce, konstrukce, vlastnosti a jejich současné využití v praxi. Hlavní náplní této práce je termovizní měření modulu tohoto typu palivových článků, je zde rozebrán princip funkce a konstrukce termokamery, postupy a podmínky pro přesná měření a možnosti použití termovize v praxi. Termografie je založená na měření infračerveného záření vycházejícího z povrchu měřeného objektu, proto jsou zde také uvedeny základní principy přenosu tepla, z nichž významný je právě přenos tepla sáláním.

V praktické části práce je pak popsáno samotné měření v laboratoři palivových článků Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava na modulu palivových článků Nexa pro různé hodnoty zátěže. Kromě samotného měření termokamerou, byly měřeny další důležité vstupní a výstupní veličiny modulu. Hodnoty naměřených veličin jsou pak pro jednotlivá zatížení porovnávány a vyhodnocovány.

1 Principy termografie

1.1 Teorie přenosu tepla

Teplota je mírou termální energie obsažené v jakémkoli objektu. Teplota kteréhokoliv objektu se dá změřit množstvím metod a prostředků a je definována teplotní stupnicí. Používají se dva druhy teplotní stupnice, a sice stupnice absolutní (jednotkou je kelvin) a stupnice relativní (jednotkou je stupeň Celsia). Teplota nám ve své podstatě říká, kterým směrem poteče tepelný tok mezi dvěma objekty. Nejnižší hodnota teploty je absolutní nula (0 K; -273,15 °C), při dosažení této teploty ustává veškerý pohyb částic.

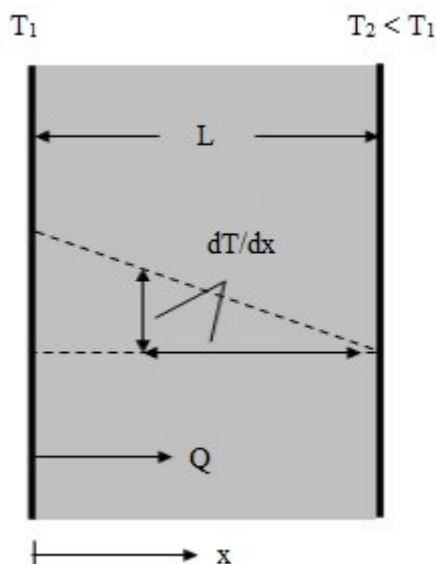
Existují tři základní typy přenosu tepla:

- vedení (kondukce)
- proudění (konvekce)
- sálání (radiace, záření)

Teplo je běžně přenášeno různou kombinací těchto typů přenosů. [1]

1.1.1 Přenos tepla vedením

Přenos tepla vedením se uplatňuje především u pevných materiálů, ale dá se uvažovat také pro kapalně a plynné látky (pokud se nepohybují vůbec, nebo jen velmi pomalu). Princip vedení tepla lze vidět na obrázku 1.1. Jedná se o přenos vibrací (kmitání) atomů pevných těles nebo srážky molekul plynů, čímž dochází k pohybu energie od teplejší molekuly směrem ke studenější.



Obrázek 1.1: Šíření tepla vedením

Vedení tepla lze popsat Fourierovým zákonem:

$$Q = -k \cdot A \frac{dT}{dx} \quad (1.1)$$

kde Q (W) je teplo přenášející se ve směru x

A (m²) je plocha kolmá na x , kterou tepelný tok prochází

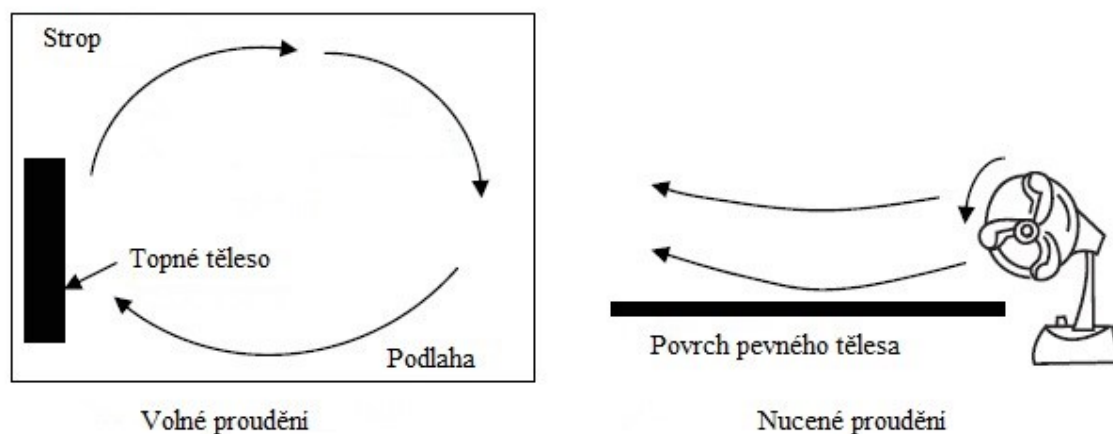
$\frac{dT}{dx}$ (K·m⁻¹) je teplotní gradient, označuje přírůstek teploty dT za vzdálenost dx

k (W·m⁻¹·K⁻¹) je součinitel tepelné vodivosti závislý na materiálu a jeho stavu, který je většinou ovlivněn jeho teplotou a tlakem

Záporné znaménko ve výrazu vyjadřuje přirozený směr toku tepla. Z rovnice vyplývá, že při přenosu vedením roste velikost přenášeného tepla se zvyšujícím se rozdílem teplot (tepelným spádem) a s rostoucí tepelnou vodivostí, a naopak klesá s rostoucí tloušťkou desky. [1] [2]

1.1.2 Přenos tepla prouděním

Šíření tepla prouděním se projevuje v kapalinách a plynech na základě jednoho ze dvou mechanismů: náhodného pohybu částic (difuze) nebo pohybu celé tekutiny (plynu) přenášející energii z místa na místo. Existují dva druhy proudění, a sice proudění volné a nucené. Nucené proudění bývá vyvoláno vnějším zdrojem (např. ventilátorem), kterým je kapalina uvedena do pohybu. U volného proudění je pohyb tekutiny dán změnami hustoty spojenými se změnami teploty při ochlazování či oteplování, tedy vztakovými silami.



Obrázek 1.2: Šíření tepla volným a nuceným prouděním

V levé části obrázku 1.2 je znázorněno volné proudění. Topné těleso ohřívá okolní vzduch, tento lehčí vzduch poté stoupá ke stropu, podél kterého se pohybuje až do spodnějších částí místnosti. Ohřátý vzduch je nahrazen vzduchem chladnějším s větší hustotou, který je nasáván podél podlahy směrem k topnému tělesu. Vzduch v místnosti cirkuluje, pomocí volného proudění se tedy ohřeje vzduch celé místnosti. Pravá část obrázku znázorňuje nucené proudění, kde je vzduch nucen

ventilátorem k pohybu. Důležitá je teplota plochy, podél které vzduch proudí. Pokud je teplota vzduchu menší, předává zeď teplo do vzduchu a naopak.

Proudění tepla můžeme popsat Newtonovým zákonem:

$$Q = h_c \cdot A(T_1 - T_2) \quad (1.2)$$

kde T_1 (°C) je teplota povrchu předávajícího teplo

T_2 (°C) je průměrná teplota plynu (kapaliny) proudící kolem pevného povrchu

h_c (W·m⁻²·K⁻¹) je součinitel přestupu tepla prouděním, roste se zvyšující se rychlostí proudění plynu (kapaliny)

Ze vztahu vyplývá, že velikost přenášeného tepla prouděním roste se zvyšujícím se rozdílem teplot a s rostoucí rychlostí proudění. [2]

1.1.3 Přenos tepla sáláním

K přenosu tepla sáláním není potřeba žádného média, jako tomu bylo u vedení a proudění. Jedná se o vyzařování elektromagnetického vlnění, má tedy podobné vlastnosti jako viditelné světlo (odraz, lom, absorpce). Záření prostupuje s nejvyšší účinností skrze vakuum, ale je schopno dobře procházet také přes mnoho druhů plynů, tekutin a dokonce i přes některé pevné látky. Každé neprůzračné těleso o teplotě vyšší než 0 K vyzařuje rychlostí světla do svého okolí tepelné záření a také okolní záření pohlcuje.

Sálání tepla můžeme popsat Stefanovým-Boltzmannovým zákonem:

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_1(T_1^4 - T_2^4) \quad (1.3)$$

kde σ je Stefanova-Boltzmannova konstanta, jejíž hodnota je $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-4}$

A_1 (m²) je plocha uvažovaného tělesa

T_1 (K) absolutní teplota uvažovaného tělesa

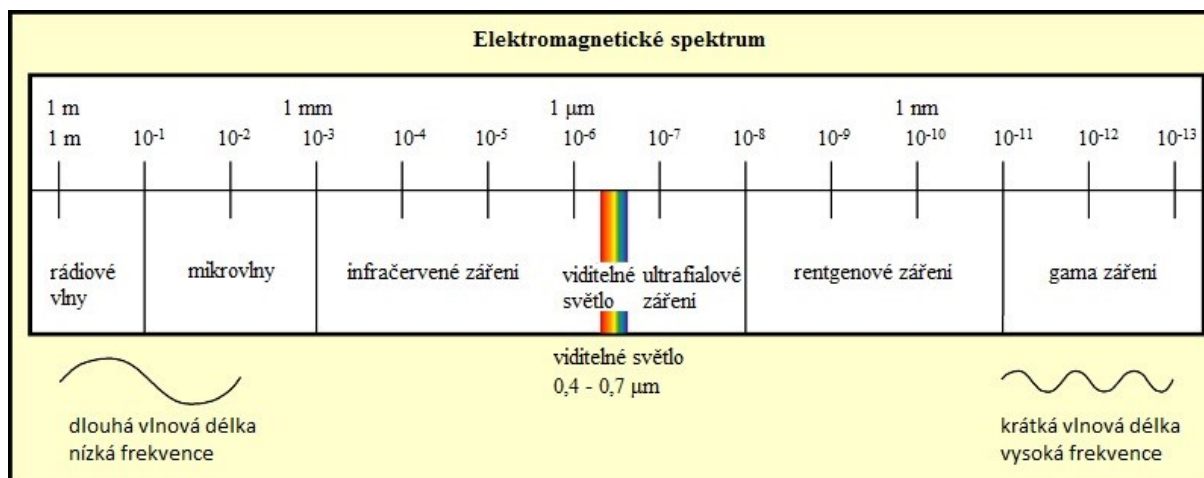
T_2 (K) absolutní teplota okolního prostoru

ε (-) je emisivita (poměrný součinitel sálání) povrchu A_1 , pro absolutně černé těleso je emisivita rovna 1, pro ostatní tělesa je menší než 1, je ovlivněna vlastnostmi povrchu, např. vrstva nátěru může velmi ovlivnit radiační vlastnosti povrchu

Zatímco přenos tepla vedením a prouděním je lineárně závislý na rozdílu teploty tělesa a jeho okolí, přenos tepla sáláním je závislý na čtvrtých mocninách těchto teplot. [2] [3]

Tepelná infračervená radiace opouštějící povrch tělesa se nazývá radiační excitance nebo také radiosita. Ta se skládá z jednotlivých částí a to z části emitované, odražené a části procházející. Teplota povrchu tělesa je ale závislá pouze na radiaci emitované. Povrchy těles teplejší než 0 K

vysílají energii v infračerveném spektru, velmi teplá tělesa pak ve spektru viditelného světla. Termovizní kamery tedy měří a zobrazují na displeji obrazy z infračervené oblasti spektra. [1]



Obrázek 1.3: Elektromagnetické spektrum [4]

Na obrázku 1.3 je znázorněno rozložení jednotlivých druhů elektromagnetického záření do spektra vlnových délek. Zatímco přenos viditelného světla probíhá v oblasti spektra přibližně od 400 nm do 750 nm, přenos tepla radiací probíhá v oblasti od 750 nm do 0,1 mm. [1]

Dalším důležitým zákonem popisujícím přenos tepla sáláním je Wienův posunovací zákon:

$$\lambda_m = \frac{b}{T} \quad (1.4)$$

kde λ_m (μm) je vlnová délka s maximální hodnotou radiace

b je Wienova konstanta $b = 2897 \mu\text{m} \cdot \text{K}$

T (K) je absolutní teplota tělesa

Wienův zákon udává, že spektrální intenzita záření M_λ je nejvyšší pro vlnovou délku λ_m , která je nepřímo úměrná absolutní teplotě tělesa T . Těleso při nízké teplotě tedy vydává záření s dlouhou vlnovou délkou (infračervené). S rostoucí teplotou stoupá intenzita záření a zároveň se maximum vyzařovaného spektra posouvá směrem ke kratším vlnovým délkám, tedy směrem k oblasti viditelného světla. [5]

Posledním důležitým zákonem je Planckův vyzařovací zákon:

$$M_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)} \quad (1.5)$$

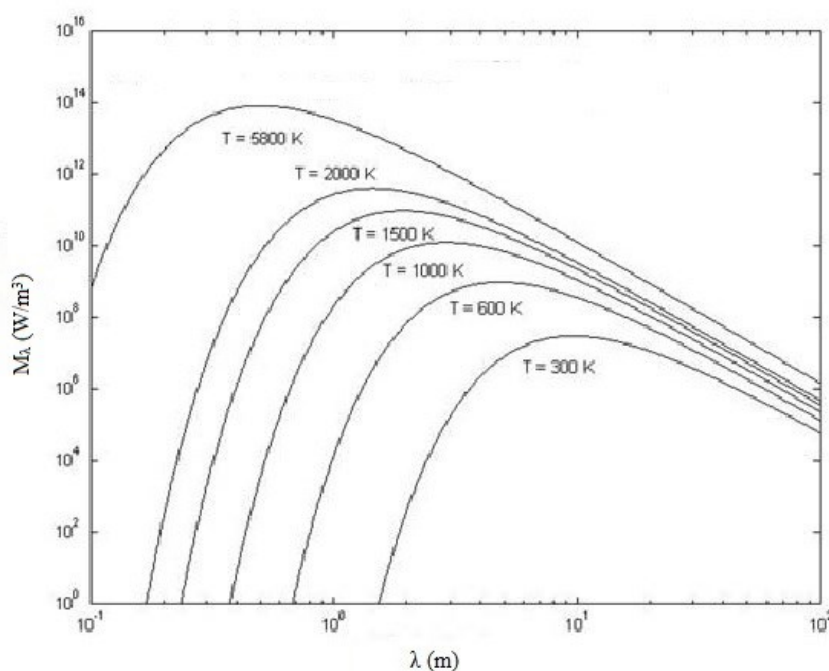
kde M_λ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$) je spektrální intenzita záření

h je Planckova konstanta $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Js

c je rychlost elektromagnetického záření ve vakuu $c = 2,998 \cdot 10^8$ m \cdot s $^{-1}$

k je Boltzmannova konstanta $k = 1,381 \cdot 10^{-23}$ J \cdot K $^{-1}$

Tento zákon vyjadřuje, oproti předchozím jmenovaným, zářivou energii pro jednotlivé vlnové délky a teplotu. Použitím Planckova zákona pro všechny vlnové délky získáme Stefanův-Boltzmannův zákon pro absolutně černé těleso. [2] [6]



Obrázek 1.4: Znáznornění Planckova a Wienova zákona [2]

Na obrázku 1.4 lze vidět, že se zvětšující se teplotou roste intenzita záření tělesa a zároveň se posouvá ke kratším vlnovým délkám.

Těleso můžeme z hlediska záření zařadit do jedné ze tří skupin: těleso absolutně černé, těleso naředlé, nebo těleso bílé. Absolutně černé těleso pohlcuje veškeré záření, které na něj dopadá, naopak těleso bílé všechno dopadající záření odráží. Černé těleso žádnou energii neodráží, ani jím žádná neprostupuje. Takové těleso ve skutečnosti neexistuje, ale mnoho povrchů těles je šedých. Šedé těleso má stejně jako černé těleso konstantní emisivitu ve všech vlnových délkách, ale tato hodnota emisivity je menší než 1, proto šedé těleso záření také propouští a odráží. Vzhledem k tomu, že vliv na teplotu tělesa má pouze emitovaná složka záření, je třeba pro termovizní měření teploty odstranit složku odraženou a prostupující. Infračervené záření ze zkoumaného objektu může k měřiči infračerveného záření procházet různými prostředními, pokud je tímto prostředím vakuum, nedochází ke ztrátě energie tohoto záření. Většinou je ale tímto prostředím vzduch, poté dochází k chybě měření, u měření na krátkou vzdálenost však lze tuto chybu zanedbat. [1]

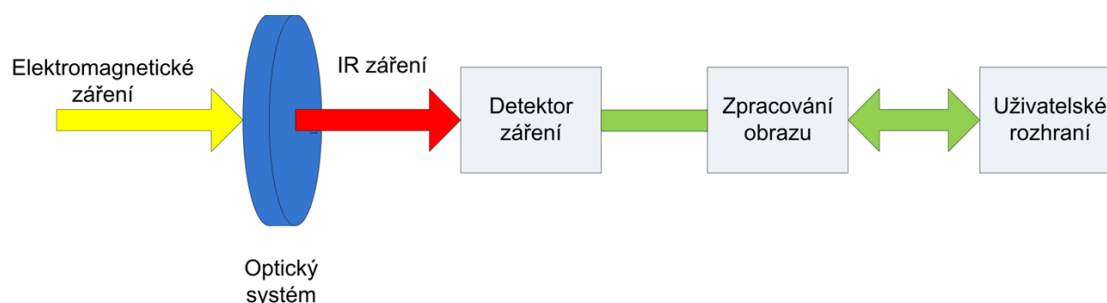
1.2 Termovizní měření

Pojem termografie označuje metodu sloužící k měření teplot, kdy určujeme tepelné pole daného povrchu. Existují dva typy termografie, a sice termografie kontaktní a bezkontaktní. U kontaktní termografie je teplota měřena přímým dotekem měřicího přístroje s povrchem měřeného objektu. K tomuto měření lze použít např. termočlánek. U bezkontaktní termografie je teplota zjišťována měřením tepelného záření daného tělesa, k tomu jsou využívány pyrometry a termokamery.

1.2.1 Konstrukce termokamery

Jak můžeme vidět na obrázku 1.5, termokamera se skládá ze tří hlavních částí, těmi jsou:

- Optický systém
- Detektor záření
- Elektronika pro zpracování a prezentaci obrazu



Obrázek 1.5: Blokové schéma termokamery [7]

Pro optický systém termokamery se dnes využívá spojka z germania s nanesenou antireflexní vrstvou, která zabraňuje odrazu záření na povrchu čočky. Optika slouží také jako filtr tím, že propouští pouze záření s takovou vlnovou délkou, která je důležitá pro bezdotykové měření teploty.

Detektor infračerveného záření slouží k převodu dopadajícího infračerveného záření na elektrický signál, který je pak zpracováván další elektronikou. Existují dva základní typy detektorů, těmi jsou detektory tepelné a fotonové. Tepelné detektory fungují na principu změny elektrických vlastností v závislosti na intenzitě dopadajícího záření. Do tohoto typu detektorů patří také mikrobolometr, který je nejčastěji používaným druhem detektoru u termokamer vůbec a který pracuje na principu změny odporu v závislosti na intenzitě záření. Fotonové detektory fungují na principu počítání fotonů (kvant elektronového záření). Tyto detektory bývají použity u nejdražších termokamer pro jejich vysokou citlivost. Tyto termokamery mají zpravidla větší hmotnost než termokamery využívající tepelné detektory z důvodu nutného chlazení fotonových detektorů. Dalším rozdílem mezi tepelnými a fotonovými detektory je velikost rozsahu vlnových délek, ve kterém jsou schopny detekovat infračervené záření. Zatímco tepelné detektory jsou širokopásmové, fotonové detektory pracují pouze v úzkém pásmu vlnových délek.

Elektronika pro zpracování obrazu a prezentaci obrazu slouží k digitalizaci elektrického signálu z detektoru a zpracování výsledného snímku tzv. termogramu, který je poté prezentován uživateli. [7]

1.2.2 Přesnost měření

Při měření termokamerou vzniká stejně jako u každého jiného měřicího přístroje chyba měření, která je dána nepřesností samotné termokamery. Velikost této chyby je udávána výrobcem a bývá zapsaná ve tvaru např. $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ nebo $\pm 1\text{ }\%$ z měřeného údaje, přičemž platí ta z hodnot, která udává větší chybu. Při teplotách do $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ to tedy bude hodnota ve stupních Celsia, při teplotách vyšších to bude hodnota v procentech. Tato chyba je pevně daná a nelze ji snížit metodikou měření. [7]

Na vyzařování tělesa má vliv několik parametrů, které musíme na termokameře nastavit, pokud chceme dosáhnout přesných výsledků měření. Tyto parametry popisují povrchové vlastnosti tělesa a vlastnosti jeho okolí. Patří zde emisivita, rychlost proudění vzduchu v okolí měřeného objektu, vlhkost vzduchu, odražená teplota, teplota vzduchu, pozorovací úhel a vzdálenost od objektu. Další podmínkou k dosažení přesného výsledku měření je tepelné ustálení přístroje, které získáme ponecháním přístroje v prostředí, ve kterém bude měření probíhat.

Emisivita je nejdůležitějším z těchto parametrů, její parametry jsou určovány laboratorně a mění se změnou teploty. Tato změna je ovšem u běžně měřených materiálů velice pozvolná a můžeme si ji při dodržení určitých předpokladů dovolit zanedbat. Obecně platí, že u materiálů s matným povrchem je emisivita vyšší, u lesklých materiálů je její hodnota naopak velmi nízká. Materiály s nízkou hodnotou emisivity se chovají jako tepelná zrcadla, to znamená, že odrazí více energie, než vyzaří. Tato vlastnost měření znesnadňuje.

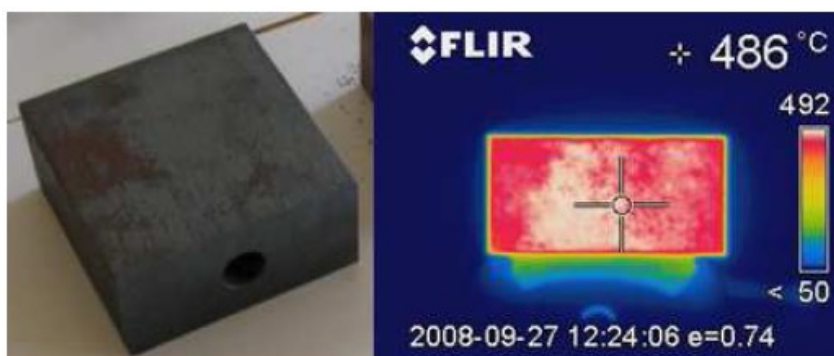
Pro přesné měření bychom měli dodržet tyto podmínky:

- rychlost větru menší než 4 ms^{-1}
- zatížení minimálně 50 %
- provoz měřeného zařízení po dobu delší než 40 minut
- správné zaostření termokamery
- rozdíl provozní a okolní teploty vyšší než $10\text{ }^{\circ}\text{C}$
- relativní vlhkost nižší než 100 %
- přesné zjištění provozního stavu a zatížení
- snímání kolmo k měřenému povrchu

Nedodržením těchto podmínek dochází ke zkreslení výsledků, například při nedostatečném rozdílu provozní teploty a teploty okolí mohou jednotlivé části měřeného objektu zanikat v přirozeném tepelném pozadí, při změně snímacího úhlu dochází zase ke změně emisivity. Ovšem ne vždy lze všechny tyto podmínky dodržet, proto zde máme možnost zavedení korekčních součinitelů pro jednotlivé parametry.

V praxi se u termovizního měření stává, že neznáme měřený materiál, hodnotu nastavované emisivity tedy musíme odhadnout, což může být zdrojem chyb. Dalším problémem může být povrchová oxidace materiálu, jejíž vliv na schopnost vyzařování povrchu můžeme vidět na obrázku 1.6. Určení vztažného místa u takového povrchu může být velmi obtížné, existují ovšem metody, kterými lze hodnotu emisivity zjistit. První touto metodou je použití referenčních štítků a barev se známou hodnotou emisivity, které se nalepí nebo nanesou na daný povrch. Další metodou je

vyvrtání otvoru do daného materiálu, tento otvor musí mít přibližně pětikrát větší hloubku než šířku, poté se chová jako černé těleso. Tyto metody nemusí být v praxi vždy použitelné, například pokud chceme měřit zařízení, které je trvale pod napětím. [6]



Obrázek 1.6: Oxidace povrchu materiálu [6]

1.2.3 Použití termovizního měření

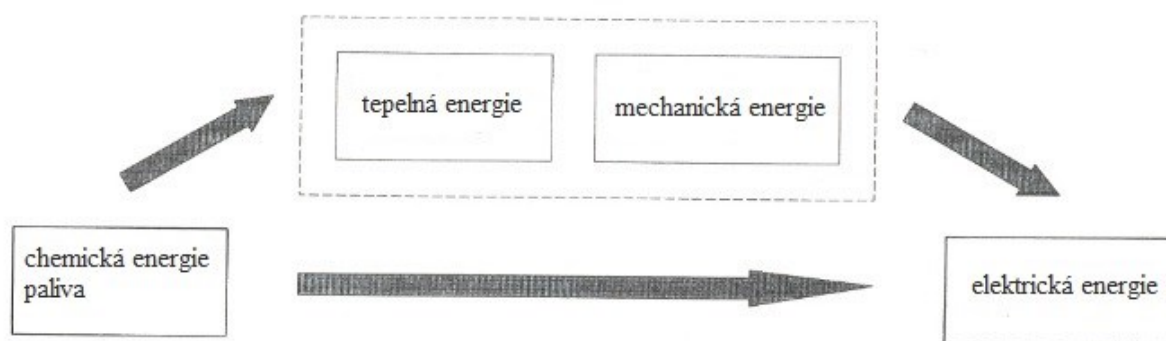
Termokamera měří povrchovou teplotu těles v mnoha bodech současně a z bodů rekonstruuje teplotní pole, které převádí na viditelný obraz se znázorněnou teplotní stupnicí. Použití termovize můžeme vidět především ve stavebnictví, průmyslu a v elektrotechnice.

Ve stavebnictví se termovizní měření využívá ke stanovení rozložení povrchových teplot budovy a zjištění, zda je toto rozložení nestandardní. Takové rozložení povrchových teplot může být způsobeno např. netěsností oken a dveří, špatně provedenými stavebními pracemi, poruchami izolace. Další využití termovize ve stavebnictví můžeme vidět při kontrole rozvodů tepla a energií (např. při hledání závad u podlahového vytápění). V elektrotechnice je použití termovize výhodné z důvodu schopnosti měření za provozu, tedy bez ovlivnění daného zařízení a bez nutnosti odstávky elektrické energie. Další výhodou je schopnost objevit poruchu již v počátečním stádiu, což umožňuje zásah při pravidelné odstávce zařízení a tím dojde ke zlepšení ekonomiky provozu. Použití termovize v elektrotechnice můžeme vidět např. při měření elektrických strojů, rozvaděčů, solárních systémů apod. V průmyslu se termovize uplatňuje tam, kde je využíváno teplonosných médií (teplárenství, chemický průmysl atd.). Termovizní diagnostikou lze odhalit všechna kritická místa, kde vlivem nesprávného nebo poruchového provozu dochází k zahřívání. [8]

Termovizní měření je moderní a efektivní diagnostická metoda, která je v této práci použita pro měření rozložení teplotního pole nízkoteplotních vodíkových PEM palivových článků, jež jsou popsány v následující kapitole.

2 Princip nízkoteplotních palivových článků typu PEM

Palivové články patří k technologiím s velkým potenciálem do budoucnosti, jejich uplatnění se předpokládá především v energetice a dopravě, kde by mohly nahradit dnešní technologie pracující na principu spalování fosilních paliv. Palivové články využívají přímou přeměnu chemické energie paliva na energii elektrickou (viz obr. 2.1), z toho vyplývá vysoká účinnost těchto článků. Další výhodou jsou téměř nulové emise škodlivých plynů do atmosféry, které jsou dnes významným ekologickým problémem. Palivové články neobsahují žádné pohyblivé části, z toho vyplývá jejich tichý chod a nízké nároky na údržbu.



Obrázek 2.1: Srovnání přímé a nepřímé přeměny chemické energie na elektrickou [10]

Palivové články jsou stavěny ve velmi širokém rozsahu (stovky W až po MW), v současnosti nahrazují především malé a střední zdroje na fosilní paliva, do budoucna se předpokládá jejich použití jako elektrárenských zdrojů. Díky nízkým emisím škodlivých plynů je zde možnost stavět elektrárny pracující s palivovými články přímo u místa spotřeby, dokonce i v hustě zalidněných oblastech a tím omezit velikost přenosových ztrát. [9] [10] [11]

2.1 Typy palivových článků

Základní princip pro přeměnu energie je u všech typů palivových článků stejný, jednotlivé typy se liší především druhem použitého elektrolytu a provozní teplotou. Tím je dáno jejich konstrukční provedení, způsob provozu a přípravy paliva. [9]

Rozdělení podle provozní teploty:

- nízkoteplotní do 220 °C
- vysokoteplotní nad 600 °C

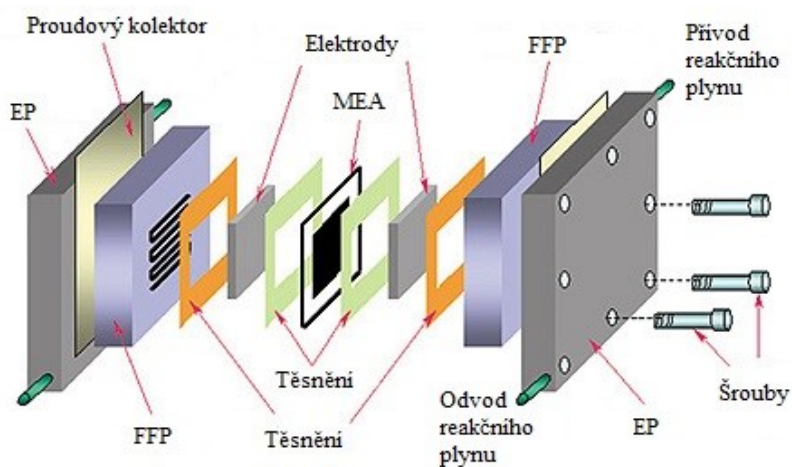
Rozdělení podle druhu elektrolytu:

- AFC – s alkalickým elektrolytem
- PEMFC – s polymerní elektrolytickou membránou/s membr. pro přímou výměnu protonů
- DMFC – přímo metanolové
- PAFC – s kyselinou fosforečnou
- MCFC – s taveninou alkalických uhličitů
- SOFC – s pevným oxidickým elektrolytem

Tabulka 2.1: Přehled vlastností druhů palivových článků [9]

Typ palivového článku	Druh elektrolytu	Provozní teplota, (°C)	Napětí naprázdno, (V DC)	Použitá paliva
AFC (Alkaline Fuel Cell)	Hydroxid draselný (KOH)	65 - 220	1,1 - 1,2	H ₂ + O ₂
PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)	Proton Exchange Membrane (Nafion, Gore)	50 - 120	1,1	H ₂ / metanol + O ₂ /vzduch
DMFC (Direct Methanol Fuel Cell)	Proton Exchange Membrane (Nafion, Gore)	130	1,1	Metanol/etanol + O ₂ /vzduch
PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell)	Kyselina fosforečná	150 - 210	1,1	H ₂ / plyn bohatý na vodík + vzduch
MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell)	Vysokoteplotní sloučenina uhlíkových solí CO ₃ (Sodík, Hořčík)	600 - 700	0,7 - 1,0	H ₂ / plyn bohatý na vodík / CO + vzduch
SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)	Sloučeniny pevných keramik (Vápník, Zirkonium)	650 - 1000	0,8 - 1,0	H ₂ / plyn bohatý na vodík / CO + vzduch

2.2 Konstrukce palivových článků typu PEM



Obrázek 2.2: Konstrukce palivového článku PEM [12]

Jak můžeme vidět na obr. 2.2, palivový článek typu PEM je složen z těchto hlavních částí:

- Membránové uskupení (MEA)
- Desky s kanálky pro rozvod reakčních plynů (FFP)
- Chladicí okruh
- Těsnění
- Koncové desky s elektrodami (EP)

Kromě výše zmíněných částí je třeba palivový článek vybavit zdrojem palivového plynu (vodíkové hospodářství), okysličovacího plynu (vzduchové hospodářství), chladicího média, zvlhčovačem, přídatnými zařízeními pro regulaci toků plynů a kapalin a pro promazávání přídatných zařízení, zařízení pro řízení elektrického a tepelného výstupu a také zařízení pro kontrolu a řízení celého výrobního procesu. [9]

2.2.1 Membránové uskupení

Uvnitř membránového uskupení dochází ke všem důležitým chemickým reakcím. Skládá se z protonově vodivé membrány, katalyzátorů a elektrod. Protonová membrána je tvořena pevným filmem o tloušťce 50–200 μm , ten se skládá z teflonových uhlíkových polymerů (např. materiál Nafion). Na obou stranách membrány jsou umístěny vrstvy katalyzátoru z platiny nebo niklu. Vrstvy katalyzátoru jsou velmi tenké (desítky μm) a slouží k podpoře reakce, aniž by byly reakcí spotřebovány. Elektrody (anoda a katoda) jsou tvořeny papírem s uhlíkovými vlákny o tloušťce desetin mm. Elektrody tvořené papírem s uhlíkovými vlákny musí být porézní, aby dokázal propouštět reakční plyny. Dále by tento papír měl být nesmáčenlivý, nekorodující a vodivý. [9]

2.2.2 Desky s kanálky pro rozvod reakčních plynů

Desky s kanálky dodávají vodík a kyslík na elektrody membránového uskupení. Jsou vyráběny z grafitu, jehož použití je vhodné především pro jeho dobrou vodivost, nízkou kontaminaci a relativně nízké náklady. Kanálky v grafitové desce mají serpentinovitý tvar (viz. obr. 2.3), který zajišťuje maximální kontakt plynu s membránovým uskupením. Kanálky na straně anody a katody jsou odlišné, tato odlišnost vyplývá z odlišných vlastností reakčních plynů, jejich ekonomické dostupnosti a způsobu použití palivového článku. Vzhledem k horší dostupnosti vodíku má anodová deska hustší síť kanálků, aby došlo k maximálnímu využití. Katodová deska má na vnější straně kanálky pro rozvod chladicího média. [9]



Obrázek 2.3: Deska s kanálky pro rozvod reakčních plynů [13]

2.2.3 Těsnění

Těsnění slouží k oddělení anodové a katodové desky tak, aby došlo k zabránění smíchání chladicího média s reakčními plyny a byla zachována elektrická vodivost. Na těsnění se používají materiály s dobrou chemickou odolností, aby vydržely v agresivním prostředí palivového článku. Těmito materiály jsou termoplasty (např. PTFE, EPDM). [14]

2.2.4 Chladicí okruh

Pro palivové články s menšími výkony se jako chladicí médium využívá vzduch. Palivové články s vyššími výkony (kW) využívají k chlazení demineralizovanou vodu pro její vysoké měrné tepelné skupenství. [9]

2.2.5 Koncové desky s elektrodami

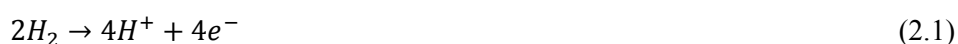
Desky z vodivého materiálu (na bázi oceli) se zabudovanými elektrodami s výstupními svorkami palivového článku slouží k vyvedení elektrického výkonu článku a chlazení elektrod. Dále jsou určeny k upevnění a stažení celého článku pomocí šroubů, tím dojde k zvětšení stykových ploch jednotlivých součástí a tím k zlepšení energetických parametrů článku. [9]

2.2.6 Soubor palivových článků

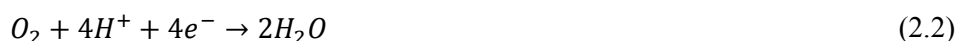
Vzhledem k tomu, že elektrické napětí jednotlivého článku je velmi nízké, spojují se palivové články do tzv. stacků (souborů). Stack se může skládat i z tisíců jednotlivých článků a výkon těchto souborů se může pohybovat od W až po MW, přičemž účinnost různě velkých stacků zůstává téměř stejná. [11]

2.3 Princip funkce palivového článku typu PEM

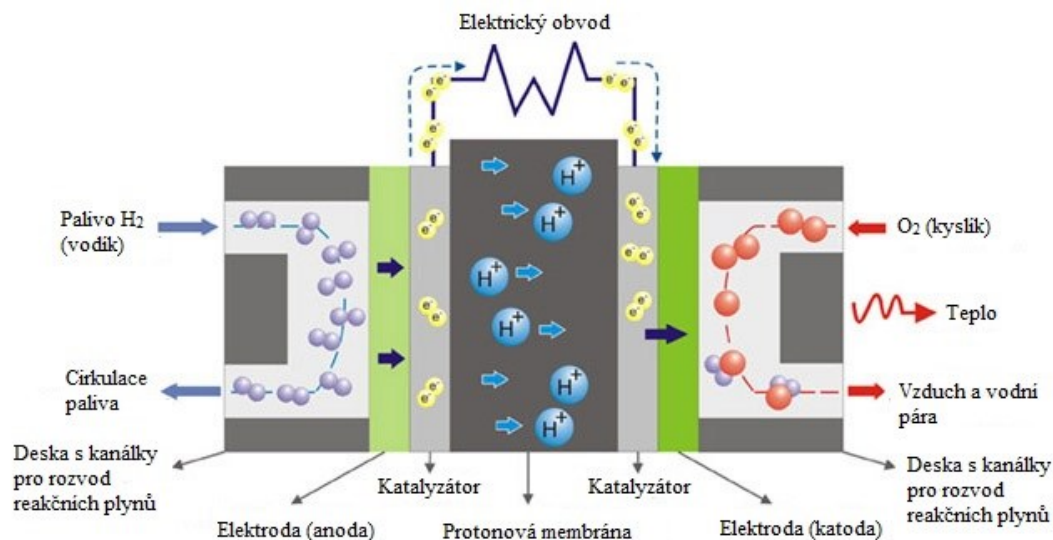
Na anodu palivového článku je přiváděn palivový plyn (vodík ve formě molekul H_2) a na katodu kyslíčoxidadlo (kyslík ve formě O_2). Při styku molekul vodíku s katalyzátorem dochází k reakci, při které se molekuly H_2 rozloží na jednotlivé atomy H, které se následně štěpí na protony H^+ a elektrony e^- . Reakci na anodě tedy můžeme popsat rovnicí:



Na katodě dochází při styku s katalyzátorem ke štěpení molekul kyslíku O_2 , které následně reagují s elektrony procházejícími zátěží za vzniku iontů O^{2-} . Membrána propouští pouze protony vodíku, které jsou přitahovány ionty kyslíku a na katodě tedy dochází ke vzniku vody a tepla, reakci je možno popsat rovnicí:



Princip funkce palivového článku typu PEM je znázorněn na obrázku 2.4. Pro efektivní provoz palivového článku je důležité správně nastavené vodíkové hospodářství. Dehydratace membrány snižuje její protonovou vodivost, přebytek vody zase může vést k zatopení elektrod. Oba tyto stavy vedou ke snížení výkonu článku. [10]



Obrázek 2.4: Princip funkce PEMFC [15]

Palivové články mohou pracovat s různými druhy reakčních plynů. Jako palivo je výhodné použití vodíku z důvodu jeho vysoké elektrochemické reaktivity oproti ostatním palivům. Dokonce i články používající jiná paliva (např. metanol) nejdříve rozkládají tato paliva na vodík a ostatní prvky. Kyslík je jako oxidační plyn využíván z důvodu jeho vysoké reakční schopnosti a zastoupení ve vzduchu.

2.4 Základní parametry palivových článků

2.4.1 Napětí palivového článku

Pro teoretické napětí palivového článku naprázdno platí vztah:

$$E = \frac{-\Delta \overline{g}_f}{zF} \quad (2.3)$$

kde $\Delta \overline{g}_f$ ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$) je hodnota volné Gibbsovy energie

z je počet elektronů přepravovaných v každé molekule paliva

F je Faradayova konstanta $F = 96485 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$

Gibbsova volná energie může být také označena jako dostupná energie pro konání vnější práce, zanedbávající jakoukoliv práci konanou změnami tlaku a (nebo) objemu. Vnější práce palivového článku zahrnuje pohyb elektronů vnějším obvodem – jakoukoliv práci vykonanou změnou objemu mezi vstupem a výstupem palivového článku článek nevyužívá. Hodnoty Gibbsovy energie vody pro různé teploty a skupenství můžeme vidět v tabulce 2.2. Hodnoty energie mají záporné znaménko, jelikož se jedná o energii uvolněnou.

Tabulka 2.2: Přehled hodnot Gibbsovy energie vody pro různé teploty [9]

Forma produktové vody	Teplota (°C)	$\overline{\Delta g_f}$ (kJ · mol ⁻¹)
Kapalná	25	-237,2
Kapalná	80	-228,2
Plynná	80	-226,1
Plynná	100	-225,2
Plynná	200	-220,4
Plynná	400	-210,3
Plynná	600	-199,6
Plynná	800	-188,6
Plynná	1 000	-177,4

Pro vodíkový palivový článek pracující při teplotě 80 °C, můžeme vypočítat teoretické napětí naprázdno následujícím způsobem:

$$E_{rev} = \frac{-\Delta \overline{g_f}}{zF} = \frac{228\,200}{2 \cdot 96\,485} = 1,18 \text{ V} \quad (2.4)$$

Skutečné napětí naprázdno bude ovšem nižší v důsledku nevratnosti palivového článku (poklesu napětí). Nevratnost palivového článku se skládá ze čtyř základních nevratností, kterými jsou:

1) Aktivační ztráty

Aktivační ztráty jsou způsobeny pomalou reakcí na povrchu elektrod, část napětí je ztracena při řízení chemické reakce přenášející elektrony z (do) elektrody. Tyto ztráty můžeme vidět v grafu 2.1 jako silně nelineární pokles napětí v levé části charakteristiky.

2) Průchod paliva mezi elektrolytem a vnitřní proud

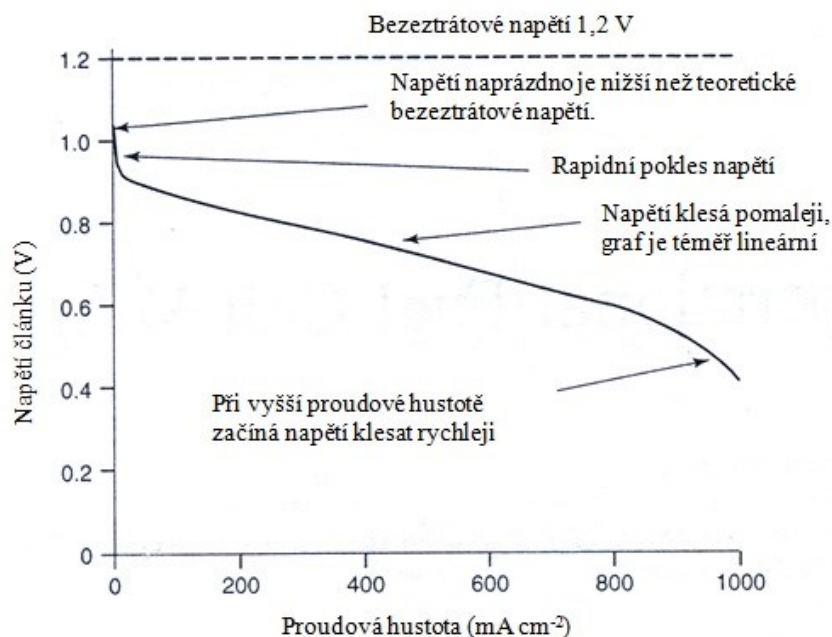
Elektrolytem palivového článku by měly procházet pouze ionty, nicméně nelze zabránit také průchodu malého množství paliva a elektronů, z toho důvodu nedochází k plnému využití paliva. Tento jev má hlavní vliv na pokles napětí naprázdno.

3) Ohmické ztráty

Ohmické ztráty jsou způsobeny elektrickým odporem toku elektronů elektrod a dalších propojení, dále také odporem toku iontů elektrolytu. Pokles napětí je lineární a můžeme jej pozorovat v prostřední části grafu 2.1.

4) Přeprava hmoty (koncentrační ztráty)

Koncentrační ztráty vyplývají z poklesu koncentrace reaktantů na povrchu elektrod při využívání paliva. Pokles napětí můžeme pozorovat v pravé části grafu 2.1.



Graf 2.1: Polarizační charakteristika palivového článku typu PEM [9]

V grafu 2.1 je na vodorovné ose použita namísto proudu veličina proudová hustota, jedná se o velikost proudu na jednotku plochy. Tato veličina nám umožňuje lepší srovnání palivových článků o rozdílné velikosti. [9]

2.4.2 Účinnost palivového článku

Celková účinnost palivového článku je velmi důležitým parametrem, její hodnota je dána jednotlivými účinnostmi článku.

Vratná účinnost η_{rev} je dána podílem Gibbsovy volné energie $\Delta\bar{g}_f$ a entalpie reakce $\Delta\bar{h}_f$. Vratná účinnost představuje teoretickou horní mez elektrické účinnosti palivového článku a její hodnota u PEM článků je 83% při použití kapalných paliv a 95% při použití paliv v plynném stavu.

$$\eta_{rev} = \frac{-\Delta\bar{g}_f}{-\Delta\bar{h}_f} \quad (2.5)$$

Napěťová účinnost η_V je definována jako podíl skutečného a teoretického napětí palivového článku. Tato účinnost popisuje poklesy napětí při odběru elektrické energie z článku.

$$\eta_V = \frac{E}{E_{rev}} = \frac{zFE}{-\Delta\bar{g}_f} \quad (2.6)$$

Proudová (palivová) účinnost η_I je definována jako poměr skutečného proudu odebíraného z článku a teoretického proudu. Tato účinnost bere v úvahu ztráty při přepravě hmoty, kdy je do palivového článku dodáváno více paliva, než je spotřebováno v reakci. Proudová účinnost je popsána vztahem (2.7), kde n_{H_2} je molární průtok vodíku.

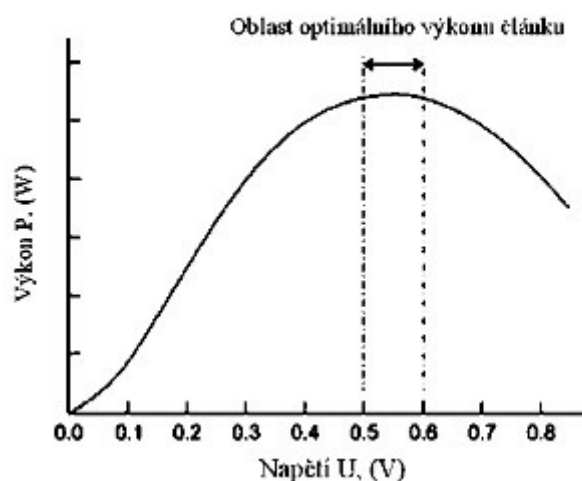
$$\eta_I = \frac{I}{I_{teor}} = \frac{I}{zFn_{H_2}} \quad (2.7)$$

Celkovou účinnost η_{celk} tedy můžeme vypočítat vztahem (2.8), kde čitatel odpovídá elektrické energii článku a jmenovatel udává rychlost, kterou je chemická energie přiváděna do buňky. [14]

$$\eta_{celk} = \eta_{rev} \cdot \eta_V \cdot \eta_I = \frac{EI}{-\Delta\bar{h}_f \cdot n_{H_2}} \quad (2.8)$$

2.4.3 Výkon palivového článku

Hodnota maximálního výkonu je u skutečného palivového článku dosahována při velikosti napětí mezi 0,5 a 0,6 V, toto napětí odpovídá relativně vysokému proudu. Výkonová křivka dosáhne své maximální hodnoty v okamžiku, kdy vnitřní rezistence článku je rovna elektrické rezistenci vnějšího obvodu. Protože účinnost článku klesá s narůstajícím napětím, musí dojít ke kompromisu mezi vysokým výkonem a vysokou účinností v závislosti na tom, jestli je pro danou aplikaci důležitější výkon článku či jeho účinnost. Není vhodné provozovat článek mimo oblast optimálního výkonu, neboť mimo optimální oblast dochází k výraznému poklesu výkonu článku. [16]



Graf 2.2: Výkonová charakteristika PEMFC [16]

2.5 Vlastnosti PEMFC

Palivové články typu PEM pracují s nízkými teplotami do 100 °C, což zajišťuje článku vysokou bezpečnost, rychlý start a menší požadavky na použité materiály. Na druhou stranu nízká provozní teplota znemožňuje použití tohoto typu článku pro kogeneraci (současná výroba elektrické a tepelné energie) a vnitřní reforming paliva. Provoz PEM článku je možný i při teplotách vyšších než 100 °C, ovšem jen při zvýšeném tlaku, aby zůstal zachován kapalný stav vody. Provoz při takto zvýšených parametrech má za následek zkrácení životnosti zařízení. Výhodami palivového článku PEM jsou jednoduchá konstrukce, dobrá mechanická odolnost, vysoké napětí, vysoká proudová a energetická hustota. Tyto články pracují při nízkém tlaku, což je velmi dobré pro jejich bezpečnost. Použití pevného suchého elektrolytu jako membrány zjednodušuje těsnění v chemickém procesu, snižuje korozi a zvyšuje životnost palivového článku. Další výhodou je

možnost pracovat se znečištěným vzduchem jako oksyličovadlem a reformátem jako palivem z důvodu malé citlivosti na obsah oxidu uhličitýho v reakčních plynech. Naopak nevýhodou je zde velká citlivost na obsah oxidu uhelnatého a síry. K dalším nevýhodám patří drahé platinové katalyzátory a membrány, dále také nutnost zvlhčování reakčního plynu, což je energeticky náročný proces, který vede k nárůstu rozměru celého systému. [9]

2.6 Použití PEMFC

Přestože byly palivové články zamýšlené pro použití v elektrárnách nebo jako generátory elektrické energie na místě spotřeby, časem se začaly uplatňovat v různých oblastech, podle vhodného použití daného typu článku. Z hlediska účinnosti a kompaktnosti jsou nejslibnější palivové články typu PEM, jejich použití můžeme tedy vidět ve třech hlavních oblastech, kterými jsou:

- Doprava
- Stacionární aplikace
- Přenosné aplikace

Směr vývoje PEMFC je dán sociálním a průmyslovým prostředím každého státu a také jejich nabídce a poptávce po energii. Například USA a Japonsko jsou zaměřeni na použití palivových článků v automobilech, zatímco evropské země se zabývají spíše použitím v autobusech a vlacích. [17]

2.6.1 Doprava

Hlavní lákadlem pro použití této technologie v dopravě je provoz vozidel šetrný k životnímu prostředí. Úspěch PEMFC v této oblasti by mohl být hlavním impulsem k jejich rozšíření i do jiných oblastí. Většina velkých výrobců automobilů se dnes aktivně podílí na vývoji vozidel s pohonem palivovými články. Takové vozidlo potřebuje integrovaný palubní systém palivových článků, zařízení pro uchovávání elektrické energie a vhodný systém pro řízení spotřeby. Testování a vývoj pohonu vozidel palivovými články je prováděn především u autobusů a obytných vozů, je to dáno tím, že tyto dopravní prostředky poskytují více vhodného prostoru k umístění potřebných systémů. [17]

Použití palivových článků můžeme vidět také u hybridního pohonu vozidel v kombinaci s bateriemi a ultrakapacitory. U hybridního pohonu se využívá rekuperace brzděné energie, kde palivové články jsou hlavním zdrojem energie, při brždění se energie ukládá do ultrakapacitorů a baterií. Tato energie se poté využívá při zvýšeném zatížení motoru (např. při rozjezdu, jízdě do kopce). Výhodami tohoto řešení jsou – snížení spotřeby vodíku a použití palivového článku s menším výkonem. Na tomto principu pracuje vozidlo TriHyBus (obr. 2.5), který slouží od roku 2009 v hromadné dopravě města Neratovice. Tento autobus má v zadní části umístěn palivový článek PEM o výkonu 50 kW. Ve srovnání s klasickými dieselovými autobusy jsou provozní náklady tohoto hybridu asi o třetinu nižší. [18]



Obrázek 2.5: TriHyBus [18]

2.6.2 Stacionární aplikace

Palivové články PEM nejsou nejvhodnějším typem pro stacionární zdroje, důvodem je potřeba použití vysoce čistého vodíku a problémy spojené s jeho dodáváním a skladováním. Jako mnohem vhodnější se i přes jejich nižší účinnost jeví vysokoteplotní články s elektrolytem na bázi pevných oxidů (SOFC) a tekutých uhličitánů (MCFC). Jejich výhodou je použití lépe dostupnějších paliv, jakým je například metan. Navzdory tomuto nedostatku se PEMFC jako stacionární zdroje energie využívají, jde ovšem spíše o zdroje s menšími výkony např. jako záložní zdroje (UPS) základnových stanic pro mobilní telefony. Pokud by ovšem byla vytvořena hospodárná a efektivní technologie pro dodávku vysoce čistého vodíku, PEMFC by byly vzhledem k jejich vysoké účinnosti nejslibnějším kandidátem pro masové použití ve stacionárních aplikacích. [17]

V současnosti je největší elektrárnou využívající palivové články PEM 1,1 MW systém firmy Ballard instalovaný v areálu ředitelství firmy Toyota ve městě Torrance v Kalifornii (obr. 2.6). Hlavní výhodou použitého systému ClearGen, který je v provozu od října roku 2012, je jeho flexibilita. Tento systém může pracovat přerušovaně k pokrytí špičkového zatížení, nebo také nepřetržitě k pokrytí základního zatížení. Vodíkové palivo je do systému dodáváno pomocí stávajícího potrubí, které zásobuje také místní čerpací stanici pro vozidla s pohonem palivovými články. [19]



Obrázek 2.6: Největší elektrárna na světě využívající PEMFC [19]

2.6.3 Přenosné aplikace

Je pravděpodobné, že by palivové články mohly nahradit baterie u různých přenosných zařízení, jakými jsou mobilní telefony, notebooky apod. Tato zařízení procházejí velmi rychlým vývojem a spotřebovávají neustále větší množství elektrické energie. Klasické baterie v moderních zařízeních se při provozu na plný výkon vybijí během několika hodin a musí dojít k výměně baterie nebo jejich zdoluhavému opětovnému nabití. To je hlavním důvodem k hledání alternativního zdroje elektrické energie pro tato zařízení, kterými by se právě mohly stát palivové články. [20]

Použití palivových článků typu PEM se zdá být díky jeho vlastnostem výhodné, má ovšem i svoje negativa, jedním z nich je obtížnost bezpečného zásobování přenosných zařízení kapalným vodíkem. Stlačený vodík používaný u vozidel zde není vhodný z důvodu nižší objemové hustoty energie a nedostatečného prostoru k jeho uskladnění. Řešením je použití vodíku v pevném nebo kapalném stavu, nevýhodou je ovšem nutnost úpravy paliva na palivo s vysokou čistotou, což dělá systém mnohem složitějším. Další možností jak se vyhnout těmto problémům je použití jiného typu palivového článku např. DMFC. [17]

3 Měření PEM palivových článků termokamerou

3.1 Laboratoř palivových článků

Samotné měření, kterým se tato práce zabývá, proběhlo v laboratoři palivových článků (LPČ) Vysoké školy báňské – Technické univerzitě Ostrava. Tato laboratoř je v provozu od roku 2007 a zaměření její výzkumné činnosti lze rozdělit do dvou hlavních směrů:

- a) výzkum mobilních prostředků využívajících vodík jako energetického nosiče (projekt HydrogenIX – prototyp vozidla pro soutěž o nejmenší spotřebu paliva Eco-Marathon firmy Shell nebo projekt HydrogenIX CITY – prototyp reálného vozidla pro příměstský provoz).
- b) výzkum malých mobilních zdrojů elektrické energie (elektrocentrál) pomocí technologie palivových článků a dále výzkum stacionárních jednotek pro výrobu a dodávku elektrické energie do sítě, na které je tato práce zaměřena.

Laboratoř je vybavena kompletním vodíkovým hospodářstvím a rozvodnou technologií vodíku a také dusíku, který zde slouží jako bezpečnostní plyn. Vodík je zde skladován v tlakových lahvích s provozním tlakem 200 bar o objemu 9 m³. Laboratoř je vybavena dvěma svazky, přičemž každý z nich se skládá z 12 lahví.

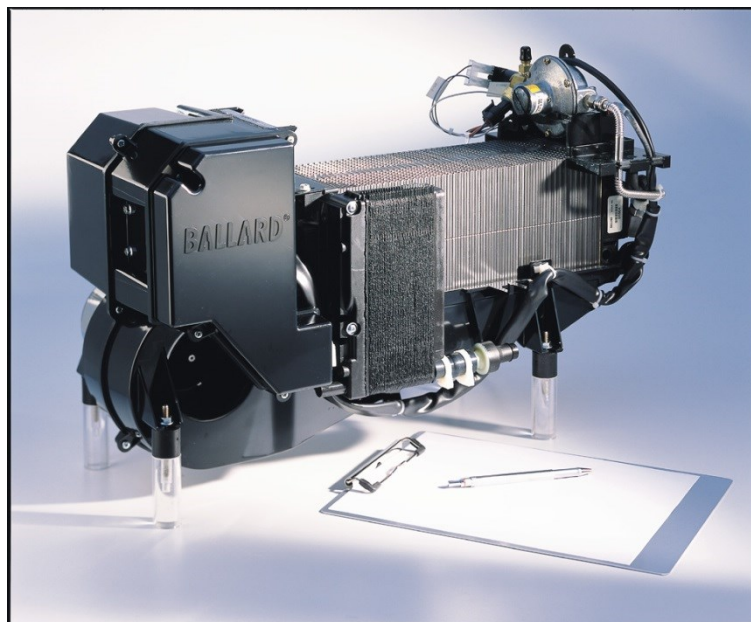
Jako alternativa je zde k dispozici laboratorní zařízení na výrobu vodíku v podobě dvou elektrolyzérů Hogen GC600, umožňující generovat vodík pomocí reverzibilních protonových membrán. V první fázi budování laboratoře byla tato zařízení napájena z elektrické sítě, ovšem později byly přepojeny do systému pro akumulaci elektrické energie dodávané ze solárních panelů umístěných na střeše LPČ a uplatnily se tak ve výzkumu vodíkových technologií pro akumulaci energie z obnovitelných zdrojů energie. Demineralizovaná voda, která je využívána jako vstupní médium elektrolyzérů, je připravována v osmotické filtrační jednotce. Elektrolyzérem vyráběný vodík je nejdříve filtrován a sušen a následně je možné ho akumulovat. Akumulace může být provedena buď do klasických tlakových lahví, nebo do zásobníku palivového plynu na bázi hydridů kovu (metalhydridů) o kapacitě 1500 litrů. Tento zásobník je především kvůli nízkému plnicímu tlaku (15 bar) využíván jako výměnná nádrž pro mobilní aplikace.

V laboratoři jsou také provozovány dva palivové články Nexa Power Module firmy Ballard, které jsou spolu s dalšími zařízeními pracujícími s vodíkem uloženy v bezpečnostních digestořích. Digestoře jsou vybaveny čidly pro měření koncentrace vodíku a také ventilací pro případ úniku vodíku z důvodu poruchy nebo při manipulaci s jeho přívody. Na jednom z těchto palivových článků bylo měření provedeno.

3.2 Nexa Power Module

Nexa Power Module, který můžeme vidět na obrázku 3.1, je systém palivového článku produkující neregulovanou stejnosměrnou elektrickou energii z dodávaného vodíku a vzduchu. Samotný modul, který se skládá ze 43 sériově spojených palivových článků, má výkon 1,2 kW a jeho napětí se mění se zatížením (cca 26 až 43 V). Kromě něj systém obsahuje také pomocná zařízení sloužící

pro jeho obsluhu. Tato zařízení zajišťují dodávku vodíku a také reakčního a chladicího vzduchu. V systému jsou také umístěna měřicí čidla, díky nimž je provoz celého systému plně automatizován. Další systémy zase kontrolují, aby množství vodíku v chladicím vzduchu nepřesáhlo mez hořlavosti, a tím zajišťují bezpečný provoz v uzavřených prostorech.

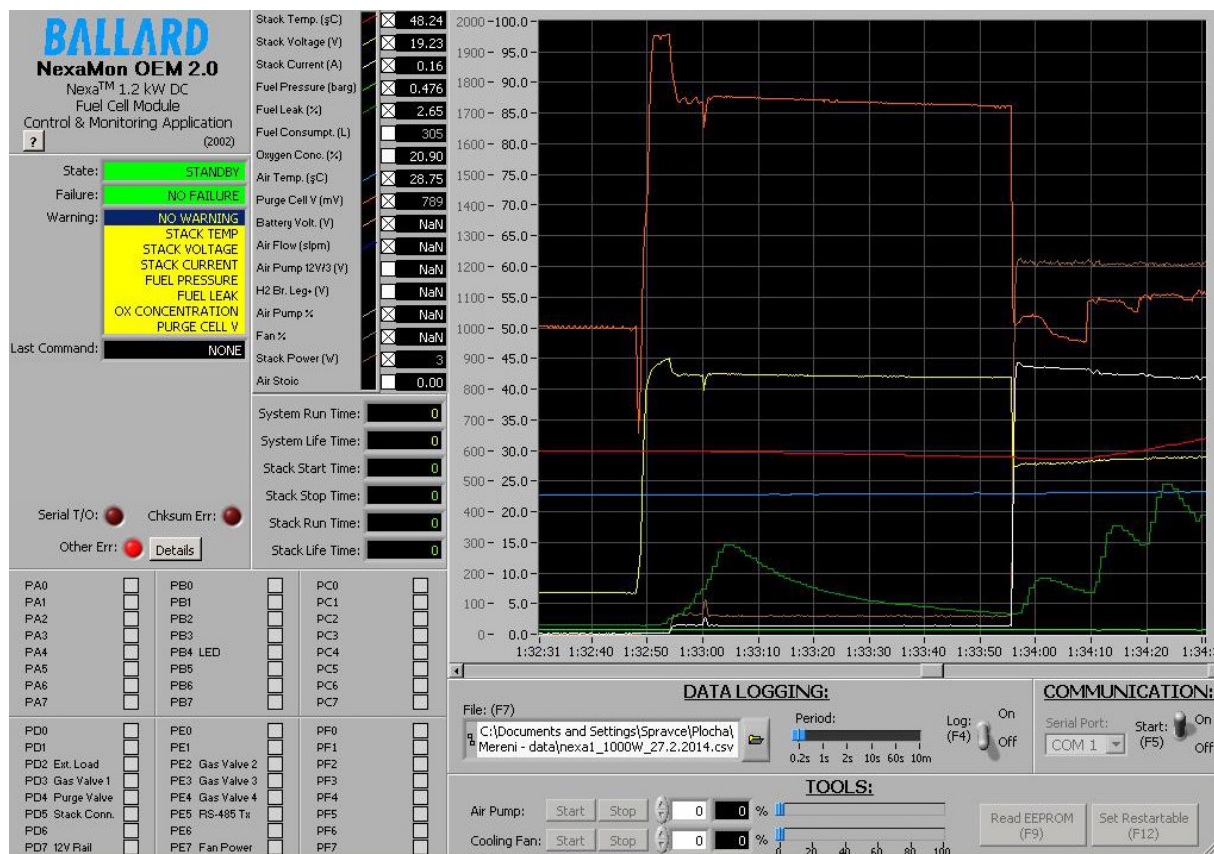


Obrázek 3.1: Modul palivového článku NEXA Power [21]

Provozní teplota článku 65 °C je udržována regulováním rychlosti chladicího ventilátoru. Dodávka reakčního vzduchu je zajištěna malým kompresorem. Rychlost kompresoru je přizpůsobena výkonu článku, při vyšších proudech je potřeba větší dodávky reakčního vzduchu. Sací filtr chrání kompresor a následné komponenty před částicemi z okolního vzduchu. Reakční vzduch je před vstupem do článku zvlhčován, aby docházelo k nasycení membrány a prodloužení životnosti článku. Dusík a voda z dodávaného vzduchu se pomalu přenáší skrz membránu a postupně se hromadí v anodě článku. To má za následek stálý pokles výkonu v určitých klíčových článcích, které bývají nazývány jako „purge cells“ (očistné články). Z tohoto důvodu dochází pravidelně k otevírání profukovacího ventilu, kdy jsou z anody odplaveny všechny neaktivní složky, a výkon článku je tak obnoven. [21]

Moduly NEXA vodíkových palivových článků mohou vyráběnou elektrickou energii dodávat do místní rozvodné sítě 400/230 V, nebo tato energie může být mařena pomocí elektronické DC zátěže, což je nutné v případě jejich testování a měření základních provozních charakteristik. Pro účely měření neelektrických a elektrických veličin a vyhodnocování energetických parametrů výrobní jednotky elektrické energie s palivovým článkem slouží měřicí stanice. Tato stanice je systém tvořený napěťovými a proudovými měřicími čidly, jejichž signál je převáděn a vyhodnocován měřicí kartou. Mezi měřené parametry patří napětí stacku palivových článků, jejich stackové proudy a výstupní proudy (tedy bez vlastní spotřeby), vstupní proudy a napětí střídačů, výstupní proudy a napětí střídačů (tedy síťové výstupní parametry výrobních bloků). Dále jsou měřeny i proudové poměry v propojkách palivových článků. Naměřená data jsou vizualizována a archivována pomocí aplikace NexaMon v prostředí Labview.

Prostředí aplikace Nexamon lze vidět na obrázku 3.2, v levé horní části jsou alarmy zobrazující se při chybě nebo překročení dovolených hodnot některé z měřených veličin. Napravo od alarmů jsou virtuální měřicí přístroje, které zobrazují aktuální hodnoty všech měřených veličin, úplně vpravo se pak z těchto hodnot vykresluje graf. Pod grafem si lze zvolit periodu vzorkování, se kterou se naměřené veličiny budou ukládat do CSV souboru. Pro všechna měření v této práci byla zvolena perioda 0,2 s.



Obrázek 3.2: Prostředí aplikace NexaMon

3.3 Průběh měření

Na modulech Nexa Power bylo provedeno několik měření, při každém z nich byl před zatížením modul nejdříve provozován ve stavu naprázdno, aby došlo k jeho zahřátí. Mezi jednotlivými měřeními bylo potřeba nechat časový odstup, aby stack mohl vychladnout. U prvního měření byla zjišťována závislost na zatížení, zátěž se tedy postupně zvyšovala až do hodnoty 1,2 kW. Při každé změně zátěže byl rovněž pořízen termogram. U ostatních měření byla nastavena hodnota zátěže, která byla po celou dobu měření konstantní. První termovizní snímky byly vždy pořízeny před zapnutím modulu (popř. v momentě jeho zatížení), další pak byly pořizovány vždy, když modul dosáhl předem stanovené teploty. Měření byla ukončena, když došlo k ustálení teploty, nebo při samočinném vypnutí při překročení limitu teploty 73 °C.

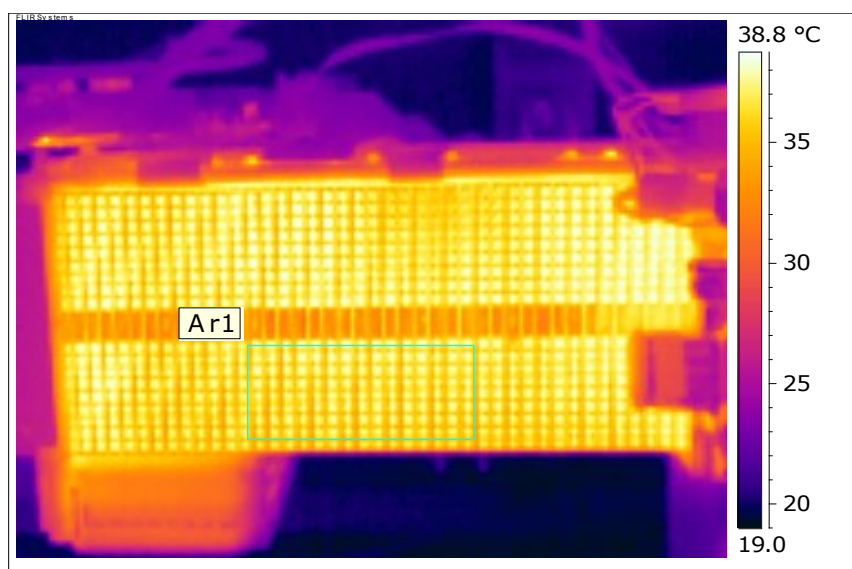
Termogramy byly pořízeny termokamerou ThermoCAM E45 od firmy FLIR Systems (viz tabulka 3.1). Pro dobrou kvalitu termosnímků bylo upraveno zaostření pomocí zaostřovacího kroužku a parametry v termokameře byly nastaveny na následující hodnoty:

- emisivita 0,96
- atmosférická a odražená teplota na 21 °C
- relativní vlhkost 30 %
- vzdálenost od měřeného objektu 0,5 m.

Tabulka 3.1: Parametry ThermoCAM E45 [22]

sériové číslo	24307337
typ detektoru	nechlazený mikrobolometr 160x120 pixelů
spektrální rozsah	7,5-13 μm
displej	2,5", barevný, LCD
teplotní rozsah	-20 °C-250 °C
přesnost	± 2 °C nebo ± 2 % z naměřené hodnoty

Termokamera byla po odměření všech hodnot připojena k PC, kde byly pořízené snímky dále zpracovávány. K tomu byl využit plugin ThermoCAM Reporter v programu MS Word, pomocí kterého byly odečítány minimální, střední a maximální teploty. Pro zvýšení přesnosti měření byly teploty odečítány plošně z obdélníkové plochy Ar1, jak lze vidět na obr. 3.3, přičemž velikost této plochy byla u všech snímků volena přibližně stejná, aby byly výsledky porovnatelné. Na termogramu (obr. 3.3) lze také spatřit vliv odražené teploty, který se zde jeví jako tmavší skvrny na stacku.



Obrázek 3.3: Ukázka termogramu

4 Vyhodnocení naměřených dat

4.1 Měření při rostoucím zatížení

Na začátku prvního měření byl modul Nexa provozován ve stavu naprázdno, kterému odpovídá první řádek tabulky 4.1. Po 5 minutách byla nastavena hodnota na elektronické zátěži na 100 W a každých 5 minut byla navýšena o dalších 100 W. Takto byla velikost zátěže zvyšována až do plného zatížení modulu 1200 W, kterému odpovídá poslední řádek tabulky 4.1.

Tabulka 4.1: Účinnost při rostoucím zatížení

$P_{\text{zátěž}}$ (W)	U_{stack} (V)	I_{stack} (A)	P_{stack} (W)	E_{FC} (Wh)	V_{H_2} (l)	E_{H_2} (Wh)	η_{FC} (%)
0	41,03	1,30	53,34	4,44	7	20,59	21,59
100	37,58	4,24	159,34	13,28	13	38,24	34,73
200	36,05	7,40	266,77	22,23	16	47,06	47,24
300	35,01	10,92	382,31	31,86	25	73,53	49,15
400	33,93	14,63	496,40	41,37	30	88,23	46,88
500	33,24	18,40	611,62	50,97	37	108,82	46,84
600	32,40	22,42	726,41	60,53	46	135,29	44,74
700	31,46	26,90	846,27	70,52	54	158,82	44,40
800	29,98	32,15	963,86	80,32	60	176,47	44,12
900	28,60	38,40	1098,24	91,52	72	211,76	43,22
1000	26,93	46,86	1261,94	105,16	88	258,82	40,63
1100	25,69	57,36	1473,58	122,80	102	300,00	40,93
1200	25,79	61,97	1598,21	133,18	124	364,70	36,52

kde $P_{\text{zátěž}}$ je nastavená zátěž na DC elektronické zátěži

P_{stack} je výstupní výkon modulu Nexa včetně vlastní spotřeby daný součinem U_{stack} a I_{stack}

E_{FC} je el. energie vyrobená modulem Nexa za dobu 5 minut při dané nastavené zátěži

V_{H_2} je množství vodíku spotřebované modulem Nexa za dobu 5 minut při dané nastavené zátěži

E_{H_2} je ekvivalentní množství energie ve spotřebovaném vodíku

η_{FC} je účinnost výroby elektrické energie modulem Nexa, daná podílem E_{FC} a E_{H_2}

Ekvivalentní množství energie ve spotřebovaném vodíku lze vypočítat pomocí rovnice:

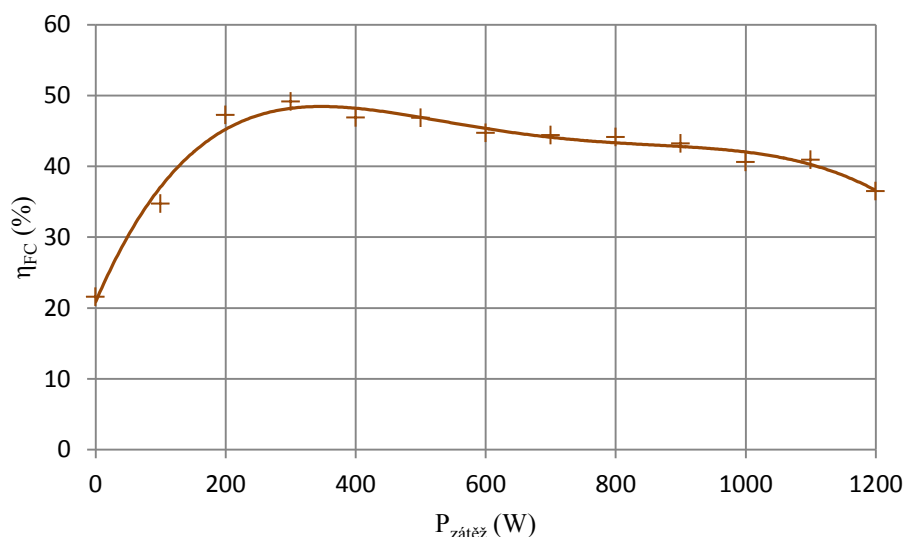
$$E_{\text{H}_2} = \frac{V_{\text{H}_2}}{V_{\text{molH}_2}} \cdot Q_t \cdot U_{\text{ROV}} \quad (4.1)$$

kde V_{molH_2} je objem 1 molu vodíku $V_{\text{molH}_2} = 22,414$ l

Q_t je velikost elektrického náboje potřebného pro výrobu 1 molu vodíku $Q_t = 53,596$ Ah

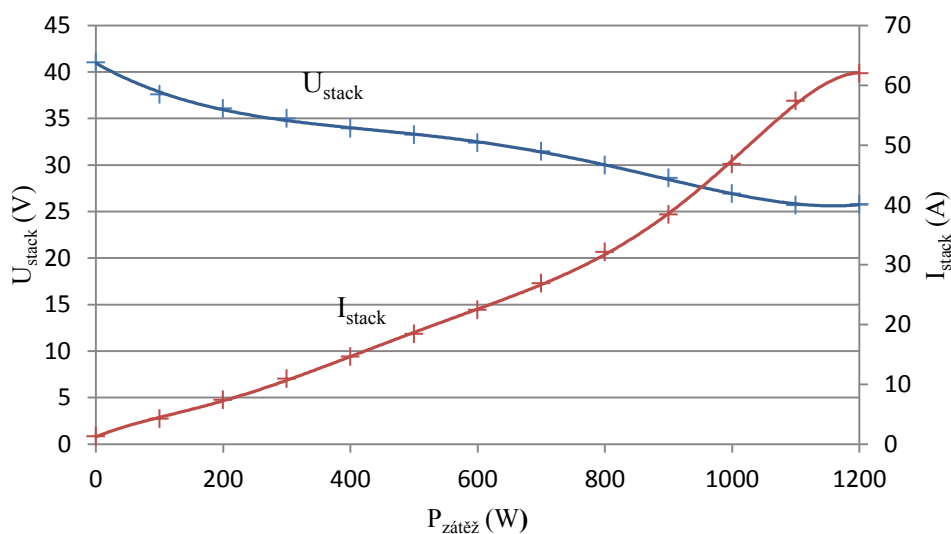
U_{ROV} je rovnovážné napětí chemické reakce probíhající v palivovém článku $U_{\text{ROV}} = 1,23$ V

V grafu 4.1 můžeme vidět, že při výrobě elektrické energie z vodíku dosahuje při plném zatížení modul palivových článků Nexa účinnosti pod 40 %. Se snižující se zátěží pak účinnost pozvolna roste, až dosáhne svého maxima (cca 50 %) při zátěži 300 W. Při dalším snížení hodnoty zátěže začne účinnost modulu velmi rychle klesat. Tento strmý pokles je dán větším poměrem vlastní spotřeby modulu k množství spotřebovávaného vodíku.



Graf 4.1: Účinnost modulu Nexa

V grafu 4.2 můžeme vidět, jak se mění hodnota výstupního napětí a proudu dodávaného do DC zátěže v závislosti na její velikosti. Naměřené napětí ve stavu naprázdno bylo 41 V, při plném zatížení pak výstupní napětí pokleslo na 25,8 V. Tyto hodnoty přibližně odpovídají údajům udávaných výrobcem a vyplývají ze sériového spojení jednotlivých palivových článků ve stacku, jejichž napětí při plném zatížení má poklesnout cca z 1 V na 0,6 V. Výstupní proud naopak vzrostl z hodnoty 1,3 A ve stavu naprázdno na 62 A při plném zatížení. Ze značného poklesu napětí můžeme říci, že se tento nízkoteplotní palivový článek chová jako „měkký zdroj“ napětí.



Graf 4.2: Výstupní napětí a proud modulu Nexa

Tabulka 4.2: Vlastní spotřeba a naměřené teploty při rostoucím zatížení

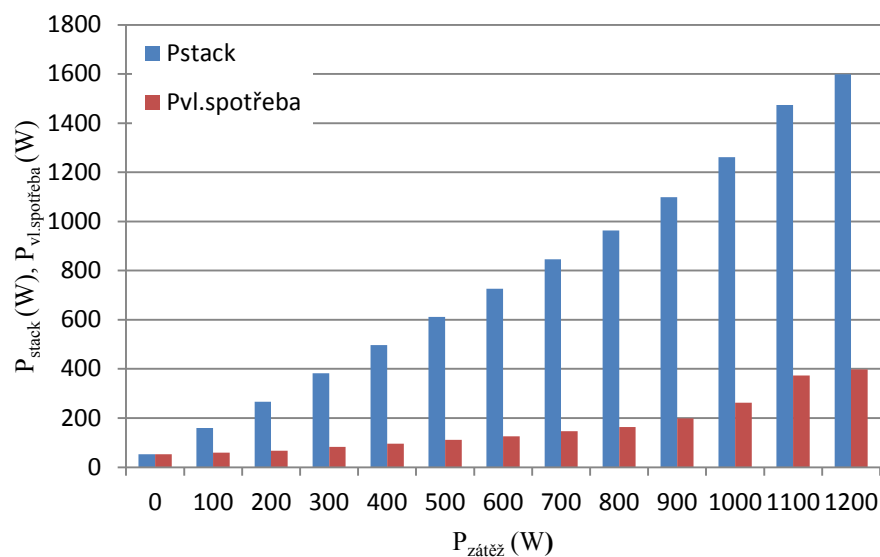
čas (min)	$P_{\text{zátěž}}$ (W)	P_{stack} (W)	$P_{\text{vl.spotřeba}}$ (W)	T_{stack} (°C)	$T_{\text{povrch-min}}$ (°C)	$T_{\text{povrch-max}}$ (°C)	$T_{\text{povrch-průměr}}$ (°C)	T_{vzduch} (°C)
0	0	0	0	21,10	19,5	20,5	19,9	21,50
5	0	53,34	53,34	22,30	21,8	22,8	22,3	21,56
10	100	159,34	59,34	24,80	22,3	24,1	23,1	21,75
15	200	266,77	66,77	29,14	26,6	29,5	28,0	22,31
20	300	382,31	82,31	34,12	29,9	34,1	32,1	23,75
25	400	496,40	96,40	39,33	33,3	38,6	36,0	24,94
30	500	611,62	111,62	44,70	39,7	44,6	42,0	26,12
35	600	726,41	126,41	50,62	43,8	50,1	46,7	27,25
40	700	846,27	146,27	55,52	47,4	53,0	50,3	28,12
45	800	963,86	163,86	60,56	50,0	57,2	53,6	28,69
50	900	1098,24	198,24	65,57	53,6	61,7	57,6	29,81
55	1000	1261,94	261,94	64,68	53,6	60,6	57,2	31,06
60	1100	1473,58	373,58	65,30	52,6	61,7	57,4	35,44
65	1200	1598,21	398,21	67,39	51,8	63,4	58,1	37,19

kde $P_{\text{vl.spotřeba}}$ (W) je vlastní spotřeba modulu Nexa, daná rozdílem veličin P_{stack} a $P_{\text{zátěž}}$

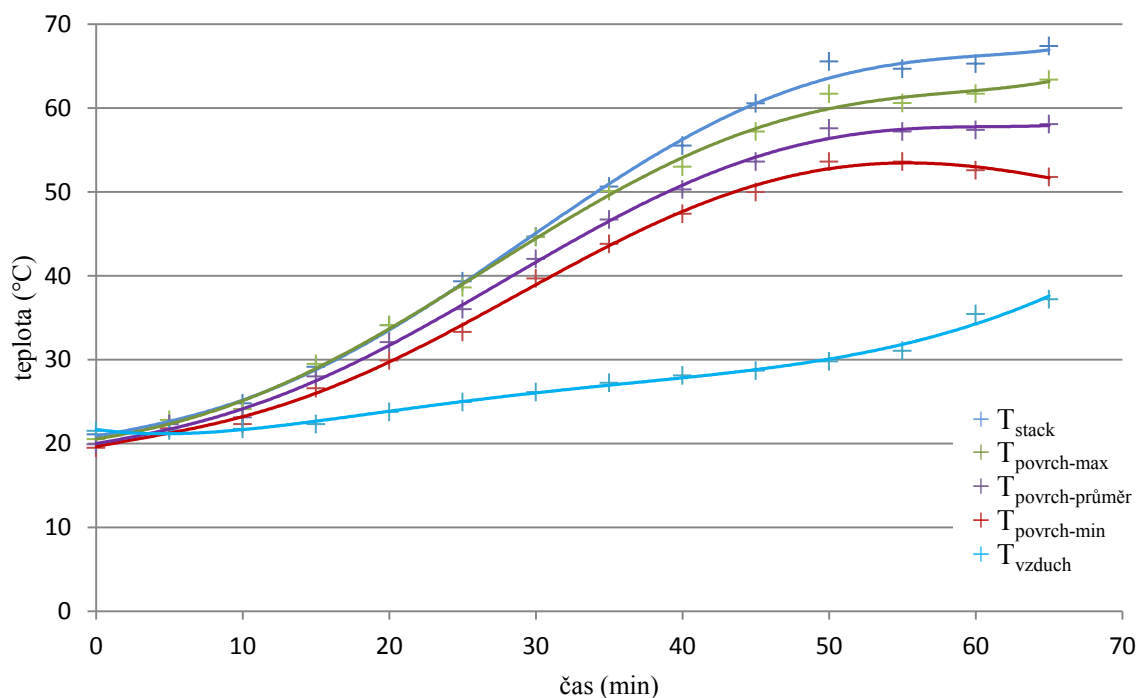
T_{stack} (°C) je vnitřní teplota modulu naměřená teplotním čidlem

T_{povrch} (°C) jsou teploty na povrchu modulu odečítané z termovizních snímků

První řádek tabulky 4.2 odpovídá vypnutému stavu, druhý řádek je pak provoz modulu ve stavu naprázdno, následující řádky odpovídají zatíženému modulu. V grafu 4.3 lze vidět nárůst vlastní spotřeby s rostoucím zatížením modulu. Ve stavu naprázdno je celý výkon 53,34 W spotřebován na provoz modulu. Při zatížení 100 W je na provoz spotřebováno asi 40 % celého výkonu. Dalším zvětšováním zátěže poměr vlastní spotřeby k celkovému výkonu stacku klesl přibližně na 20 % a kolem této hodnoty se dál pohyboval. Až při nastavení zátěže na 1000 W došlo k nárůstu tohoto poměru cca na 25 %, to je způsobeno vyššími nároky na chlazení modulu. Graf 4.4 zobrazuje růst teplot naměřených na modulu. Vnitřní teplota modulu se cca po 45 minutách (při nastavené zátěži 900 W) od spuštění modulu ustálila přibližně na pracovní teplotě 65 °C. Teplota na povrchu byla zpočátku přibližně stejná jako vnitřní teplota modulu, její růst byl ovšem pomalejší a ustálila se přibližně na 58 °C (průměrná hodnota). Teplota chladícího vzduchu rostla rychleji se zvyšující se teplotou modulu, před koncem měření dosáhla hodnoty 37 °C.



Graf 4.3: Vlastní spotřeba modulu Nexa



Graf 4.4: Teploty při rostoucím zatížení

4.2 Měření při zatížení 1000 W

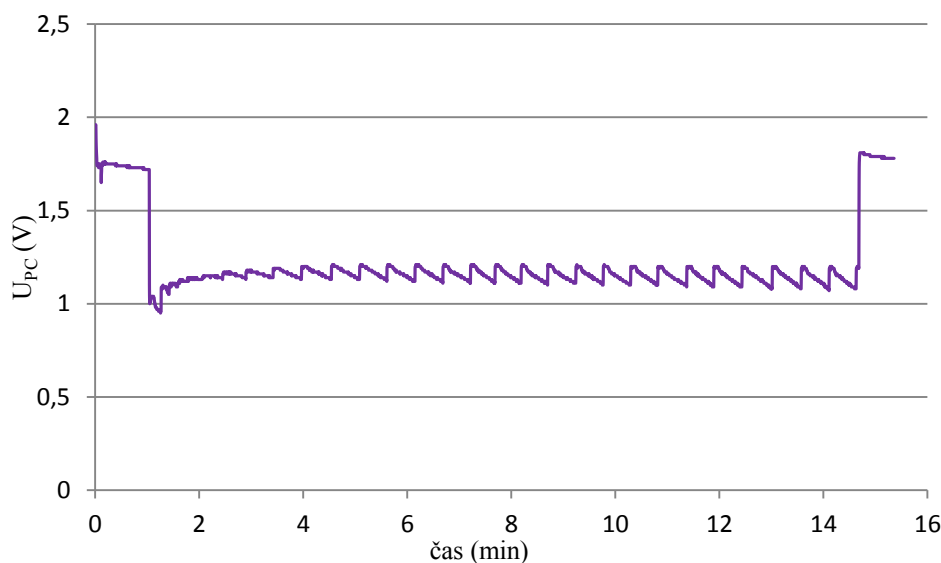
Při druhém měření byla na modulu po krátké době provozu naprázdno provedena skoková změna zatížení na 1000 W. Velikost zatížení již zůstala konstantní po celou dobu měření a byly pouze snímány termogramy a to vždy, když teplota oproti předchozí teplotě vzrostla o 5 °C až do teploty 65 °C, kdy byl modul uveden zpět do stavu naprázdno, a měření bylo ukončeno. Okamžiku zatížení odpovídá první hodnota tabulky 4.3 a lze ho vidět také v grafu 4.5 jako skokový pokles napětí očišťných článků U_{PC} přibližně z 1,7 V na 1,1 V. Při zatížení lze vidět kolísání napětí U_{PC} , které

je způsobeno zanesením anody palivového článku nečistotami a jeho následným profukem. Rychlost poklesu napětí se během měření zvyšovala, proto se dá předpokládat, že se četnost profuku s dobou provozu bude také zvyšovat.

Tabulka 4.3: Naměřené hodnoty při zatížení 1000 W

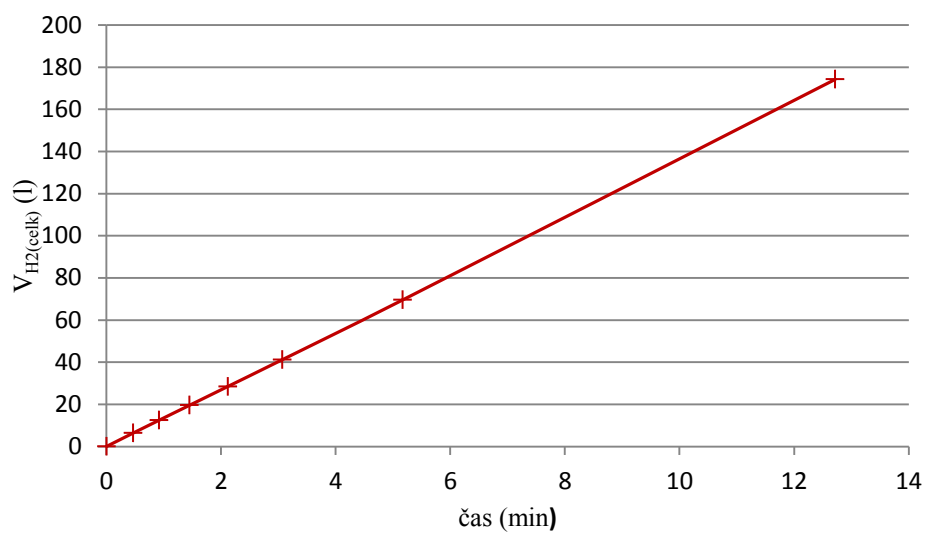
T_{stack} (°C)	$T_{\text{povrch-min}}$ (°C)	$T_{\text{povrch-max}}$ (°C)	$T_{\text{povrch-prumer}}$ (°C)	T_{vzduch} (°C)	$V_{\text{H2(celk)}}$ (l)	čas (s)	čas (min)
30,0	22,9	25,1	24,0	23,1	0,0	0,0	0,0
35,1	29,5	36,0	33,0	23,6	6,4	28,0	0,5
40,1	34,1	42,0	38,1	24,1	12,4	55,0	0,9
45,1	37,5	47,0	42,5	24,6	19,6	87,0	1,5
50,1	40,4	51,3	46,6	25,5	28,5	127,0	2,1
55,1	43,4	54,7	49,8	26,6	41,2	184,0	3,1
60,0	45,7	57,7	52,6	28,4	69,5	310,0	5,2
65,0	47,8	60,8	55,4	31,6	174,2	763,0	12,7

kde $V_{\text{H2(celk)}}$ je celkové množství spotřebovaného vodíku od počátku měření

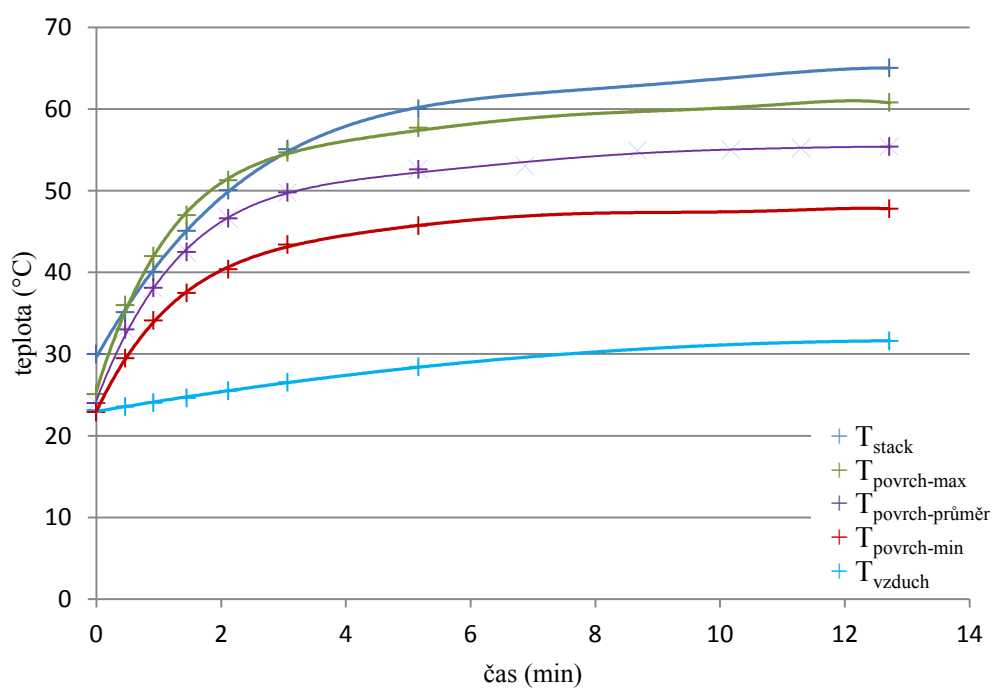


Graf 4.5: Napětí očistného článku

Během zatížení bylo modulem Nexa spotřebováno celkem 174,2 l vodíku. V grafu 4.6 můžeme vidět, že spotřeba za čas při konstantním zatížení se s rostoucí teplotou téměř nemění. V grafu 4.7 můžeme vidět při skokovém zatížení 1000 W velmi rychlý nárůst teploty modulu, kdy vnitřní teplota stacku dosáhla již po 5 minutách teploty 60 °C. Poté už se teplota zvyšovala mnohem pomaleji, teplota 65 °C byla naměřena až po necelých 13 minutách od okamžiku zatížení modulu. Průměrná teplota povrchu byla na konci měření o 7,6 °C nižší než teplota vnitřní. V grafu lze rovněž vidět, že naměřená maximální teplota povrchu v určitých okamžicích převyšuje vnitřní teplotu stacku. Tato situace nastává především u nižších teplot, kdy je rozdíl vnitřní a povrchové teploty minimální a je způsoben vlastní chybou termokamery.



Graf 4.6: Spotřeba modulu při zátěži 1000 W



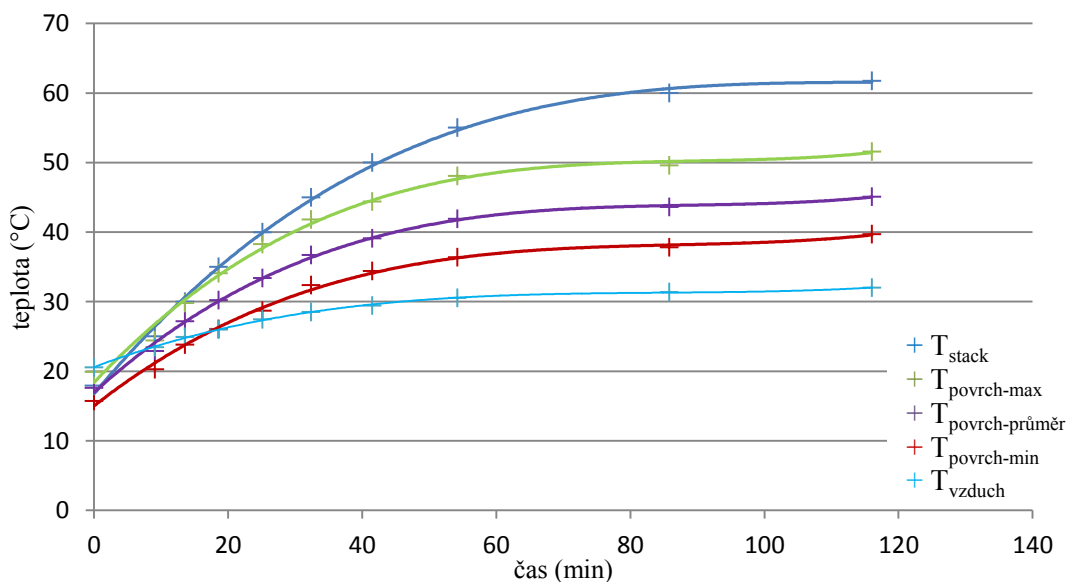
Graf 4.7: Teploty při zátěži 1000 W

4.3 Měření při zatížení 100 W s vypnutým chlazením

Při dalším měření byl vypnut chladicí ventilátor a modul byl zatížen 100 W po celou dobu měření. Termogramy se stejně jako u předchozího měření snímaly při zvýšení vnitřní teploty měřené čidlem o 5 °C oproti předchozí hodnotě. Měření bylo ukončeno po 116 minutách, kdy se teplota ustálila na cca 62 °C. V grafu 4.7 lze vidět, že při takto nízkém zatížení narůstala teplota velmi pomalu i přesto, že byl chladicí systém modulu vypnut. Průměrná teplota povrchu se ustálila na hodnotě 45 °C.

Tabulka 4.4: Naměřené hodnoty při zatížení 100 W bez chlazení

T_{stack} (°C)	$T_{\text{povrch-min}}$ (°C)	$T_{\text{povrch-max}}$ (°C)	$T_{\text{povrch-průměr}}$ (°C)	T_{vzduch} (°C)	$V_{\text{H2(celk)}}$ (l)	čas (s)	čas (min)
17,9	15,7	19,9	17,6	20,6	0,0	0,0	0,0
25,0	20,3	24,4	22,9	23,4	7,3	545,4	9,1
30,0	23,8	29,8	27,2	24,9	12,9	812,4	13,5
35,0	26,1	34,1	30,2	26,0	19,3	1116,0	18,6
40,0	28,7	38,3	33,4	27,4	27,4	1508,0	25,1
45,0	32,4	41,8	36,7	28,5	36,4	1944,0	32,4
50,0	34,4	44,4	39,1	29,4	47,6	2490,0	41,5
55,0	36,4	48,1	41,9	30,6	63,4	3253,0	54,2
60,0	37,8	49,6	43,6	31,4	102,9	5149,0	85,8
61,8	39,7	51,6	45,1	32,0	141,0	6962,0	116,0



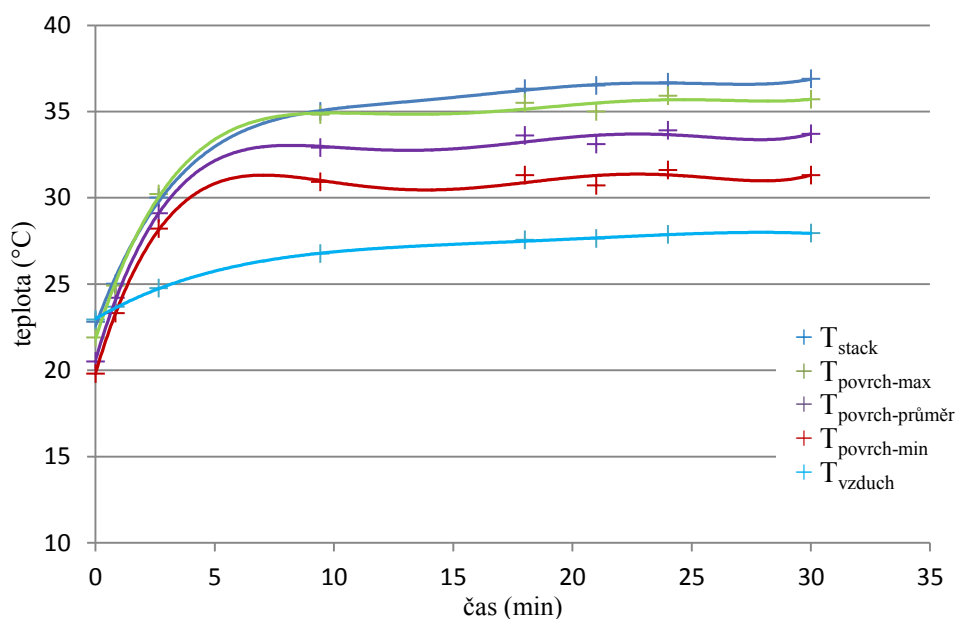
Graf 4.8: Teploty modulu při zátěži 100 W

4.4 Měření při zatížení 300 W

V grafu 4.9 lze vidět, že při nastavení zátěže modulu na 300 W vnitřní teplota stacku během cca 10 minut narostla na hodnotu 35 °C. Během dalších 20 minut měření pak vzrostla pouze na cca 37 °C. Průměrná povrchová teplota se ustálila přibližně na 34 °C. Při takto nízkých teplotách je rozdíl mezi vnitřní a povrchovou teplotou minimální.

Tabulka 4.5: Naměřené hodnoty při zatížení 300 W

T_{stack} (°C)	$T_{\text{povrch-min}}$ (°C)	$T_{\text{povrch-max}}$ (°C)	$T_{\text{povrch-průměr}}$ (°C)	T_{vzduch} (°C)	$V_{\text{H2(celk)}}$ (l)	čas (s)	čas (min)
22,8	19,8	21,9	20,5	22,94	0,0	0	0
25,0	23,3	24,9	24,2	23,67	4,0	50,0	0,8
30,0	28,2	30,2	29,1	24,75	11,0	159,0	2,7
35,0	30,9	34,8	32,9	26,75	35,7	566,0	9,4
36,3	31,3	35,5	33,6	27,56	68,1	1080,0	18,0
36,5	30,7	35,0	33,1	27,62	79,4	1260,0	21,0
36,7	31,6	35,9	33,9	27,87	90,8	1440,0	24,0
36,9	31,3	35,7	33,7	27,94	113,5	1800,0	30,0



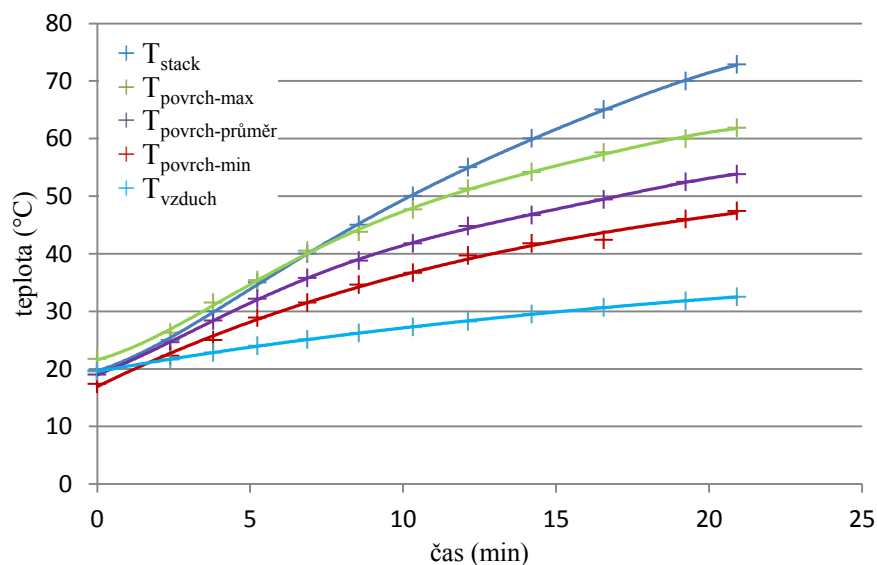
Graf 4.9: Teploty modulu při zátěži 300 W

4.5 Měření při zatížení 300 W s vypnutým chlazením

V grafu 4.10 můžeme vidět, že při nastavené zátěži 300 W a vypnutém chladicím ventilátoru modulu rostla vnitřní teplota téměř lineárně po celou dobu měření. Po 21 minutách dosáhla vnitřní teplota 73 °C, což je hodnota, při jejímž překročení dochází k samočinnému vypnutí modulu. Průměrná povrchová teplota před vypnutím modulu dosáhla 54 °C. Teplota vzduchu narostla na hodnotu 32,5 °C.

Tabulka 4.6: Naměřené hodnoty při zatížení 300 W bez chlazení

T_{stack} (°C)	$T_{\text{povrch-min}}$ (°C)	$T_{\text{povrch-max}}$ (°C)	$T_{\text{povrch-průměr}}$ (°C)	T_{vzduch} (°C)	$V_{\text{H2(celk)}}$ (l)	čas (s)	čas (min)
19,7	17,4	21,7	19,0	19,6	0,0	0,0	0,0
25,0	22,3	26,3	24,6	21,6	5,9	143,6	2,4
30,0	25,0	31,5	28,4	22,8	10,7	227,6	3,8
35,0	28,9	35,4	32,2	24,0	15,6	314,6	5,2
40,0	31,5	40,5	35,8	25,1	21,1	412,6	6,9
45,0	34,6	43,8	38,8	26,3	26,8	513,6	8,6
50,0	36,7	47,7	41,8	27,3	32,7	619,6	10,3
55,0	39,7	51,3	44,8	28,3	38,7	727,6	12,1
60,0	41,8	54,2	46,7	29,5	45,7	852,6	14,2
65,0	42,4	57,6	49,4	30,7	53,6	993,6	16,6
70,0	46,0	60,0	52,5	31,8	62,6	1154,6	19,2
72,9	47,4	61,9	53,8	32,5	68,3	1254,6	20,9

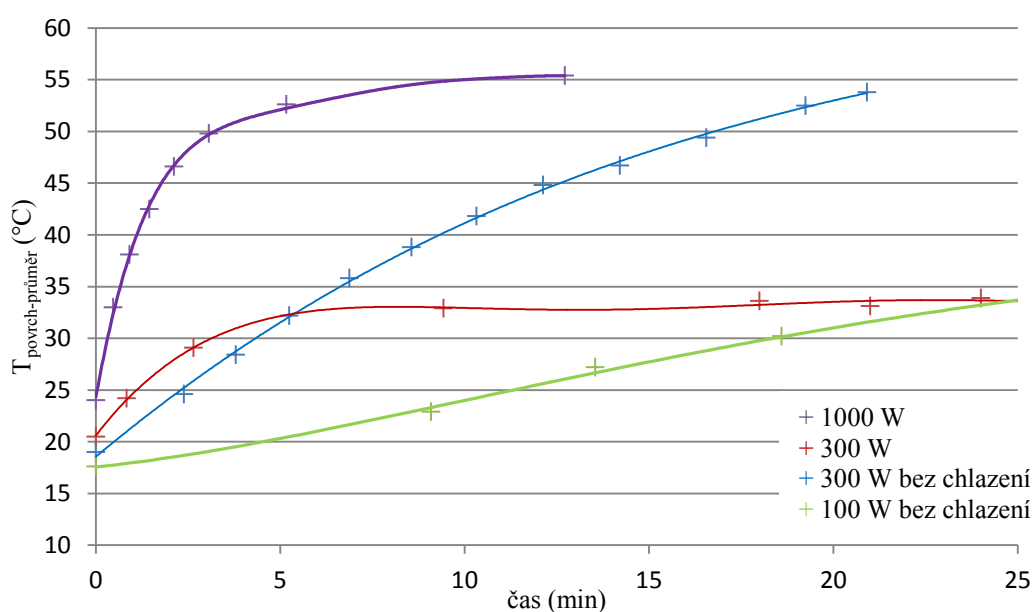


Graf 4.10: Teploty modulu při zátěži 300 W bez chlazení

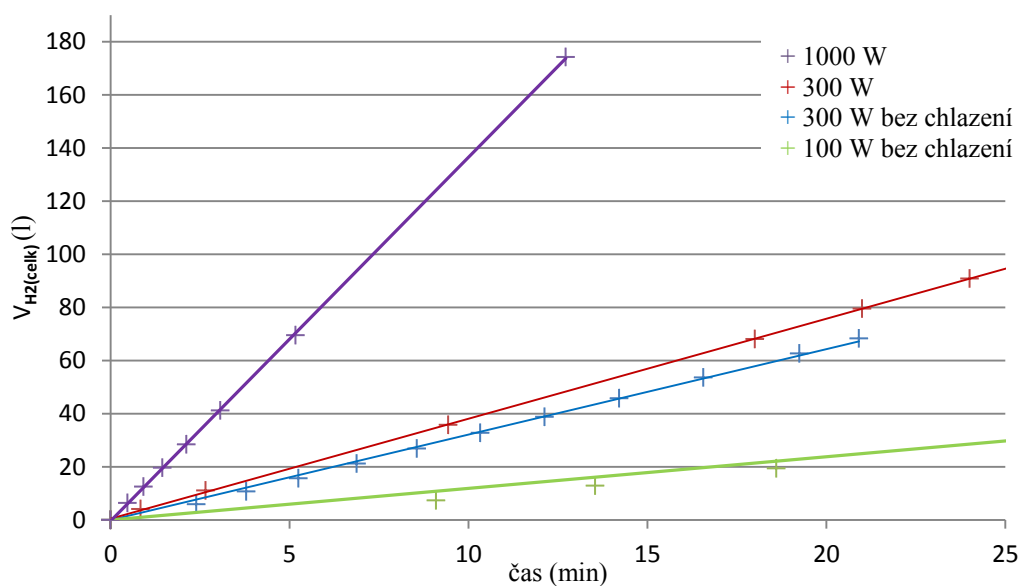
4.6 Porovnání hodnot u konstantního zatížení

V grafu 4.10 můžeme vidět přímé srovnání průměrných povrchových teplot při různých hodnotách zatížení. Čím více byl modul zatížen, tím rychleji vzrůstala jeho teplota. V tomto grafu lze také vidět vliv chlazení na růst teploty. Při zatížení 300 W nemělo zpočátku zapnuté chlazení na růst teploty vliv a průběh byl přibližně stejný, jako když bylo chlazení vypnuto. Ovšem když teplota dosáhla hodnoty cca 30 °C, začal chladicí ventilátor působit a teplota modulu se rychle ustálila, zatímco při vypnutém chlazení stoupala dále až do samočinného vypnutí modulu.

Z naměřených hodnot zanesených do grafu 4.11 lze vidět, že spotřeba vodíku modulem roste úměrně s jeho zatížením. Také zde můžeme vidět zvýšení vlastní spotřeby modulu při zapnutém chlazení, kdy spotřeba vodíku oproti měření s vypnutým chlazením vzrostla asi o 20 %.



Graf 4.11: Teploty povrchu při různém zatížení



Graf 4.12: Spotřeba vodíku při různém zatížení

Závěr

Z naměřených hodnot modulu nízkoteplotních palivových článků bylo zjištěno, že nejvyšší účinnosti téměř 50 % dosahuje modul při zatížení 300 W, při plném zatížení 1200 W pak účinnost klesá na 36,5 %. Dále z naměřených hodnot vyplývá, že se zvyšováním zátěže napětí modulu klesá, chová se tedy jako měkký zdroj napětí. Také hodnota napětí při konstantním zatížení kolísá, to je způsobeno usazováním nečistot z reakčního plynu v článcích na straně anody, při kterém dochází k poklesu napětí těchto článků, které je modulem měřeno. Pokud dojde k výraznému poklesu tohoto napětí, modul obstará profuk těchto článků proudem vodíku a tím dochází k obnově napětí. Z naměřených hodnot lze dále usoudit, že spotřeba vodíku za čas není závislá na rostoucí teplotě modulu a při konstantním zatížení modulu je hodnota spotřeby za čas rovněž konstantní. Spotřeba vodíku je tedy závislá pouze na velikosti zatížení a také na tom, zda je modul chlazen vlastním ventilátorem, při jehož zapnutí vzrostla spotřeba přibližně o 20 %.

Termografie je velmi efektivní diagnostická metoda, s jejíž pomocí jsme schopni nalézt poruchy na zařízení, aniž bychom do něj museli nějak zasahovat. Na termogramech lze vidět, že teplota na povrchu celého stacku je rovnoměrně rozložená, proto může konstatovat, že žádný z článků není poškozen a modul funguje správně. V grafech lze vidět, že velikost zátěže výrazně ovlivňuje oteplení modulu. Při 100W zátěži dosáhla teplota stacku 60 °C až po 85 minutách, zatímco při zatížení 300 W dosáhla této teploty již po 14 minutách. Teplota modulu je rovněž velmi ovlivněna chlazením. Teplota povrchu modulu je vždy nižší než vnitřní teplota, přičemž při nízkých teplotách (blízkých teplotě okolí) je tento rozdíl nepatrný, s rostoucí vnitřní teplotou se ovšem tato odchylka zvětšuje, kdy při 70 °C byla průměrná hodnota povrchové teploty nižší přibližně o 30 %.

Seznam použité literatury

- [1] Termovizní měření - Teorie. *Termovize* [online]. TERMOVIZE s.r.o., © 2013 [cit. 2013-12-15]. Dostupné z: <http://www.termovize.com/termovizni-mereni-teorie>
- [2] LONG, Chris a Naser SAYMA. *Heat Transfer*. Ventus Publishing ApS, 2009. ISBN 978-87-7681-432-8.
- [3] HAVELKA, Otto et al. *Elektrické přístroje*. Praha: SNTL, 1985, 440 s. ISBN 04-529-85.
- [4] The Electromagnetic Spectrum. *Columbia University* [online]. [cit. 2013-12-15]. Dostupné z: http://www.columbia.edu/~vjd1/electromag_spectrum.htm
- [5] HRADÍLEK, Zdeněk, Ilona LÁZNIČKOVÁ a Vladimír KRÁL. *Elektrotepelná technika*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 266 s. ISBN 978-80-01-04938-9.
- [6] HRABČÍK, Miroslav. *Využití termovize při diagnostice prvků distribuční sítě*. Ostrava, 2011. Disertační práce. VŠB-TUO.
- [7] *Průvodce světem termokamer* [online]. Centrum termografie [cit. 2014-04-10]. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz>
- [8] Termovize. *Energetický štítek budovy, průkazy energetické náročnosti budov a energetické audit* [online]. AB Solartrip [cit. 2014-04-10]. Dostupné z: <http://www.energyprukaz.cz/termovize/>
- [9] SOKANSKÝ, Karel. *Palivové články v energetice*. Ostrava: VŠB-TUO, 2007.
- [10] KORDESCH, Karl a Günter SIMADER. *Fuel Cells and Their Applications*. New York: VCH, 1996. ISBN 3-527-28579-2.
- [11] PORŠ, Zdeněk. *Palivové články* [online]. Ústav Jaderného Výzkumu Řež, a.s., 2002 [cit. 2013-12-13]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/palivove-clanky.pdf>
- [12] Fuel Cell Design. *Scientific Computing World* [online]. Cambridge: Europa Science, © 2003-2013 [cit. 2013-12-15]. Dostupné z: http://www.scientific-computing.com/features/feature.php?feature_id=126
- [13] *Materials Synthesis at ORNL* [online]. Oak Ridge National Laboratory, 24.2.2009 [cit. 2013-12-15]. Dostupné z: http://web.ornl.gov/sci/physical_sciences_directorate/mst/Materials_Synthesis/index.shtml
- [14] MIKKOLA, Mikko. *About Fuel Cells* [online]. TKK Advanced Energy Systems, 2007 [cit. 2013-12-13]. Dostupné z: http://tfy.tkk.fi/aes/AES/projects/renew/fuelcell/fc_index.html
- [15] PEMFC. *G-Energy Technologies* [online]. G-Energy Technologies, © 2012 [cit. 2013-12-15]. Dostupné z: http://www.g-energy.com.my/fuel_cell_tech_PEMFC.html

- [16] KAZÁRIK, Jiří. *Palivový článek a jeho demonstrační aplikace pro pohon laboratorního modelu* [online]. Ostrava: VŠB-TUO, 2010 [cit. 2013-12-13]. Dostupné z: http://mostech.vsb.cz/source/dokumenty/1_Demonstrace%20pal.clanku.pdf
- [17] WEE, Jung-Ho. *Applications of proton exchange membrane fuel cell systems* [online]. Seoul: Korea University, 2006 [cit. 2013-12-13]. Dostupné z: <http://membrane.ustc.edu.cn/class/ref/19%20Applications%20of%20proton%20exchange%20membrane%20fuel%20cell%20systems.pdf>
- [18] *TriHyBus - Vodíkový autobus s palivovými články* [online]. Praha: Ústav jaderného výzkumu Řež a.s., © 2008 [cit. 2013-12-13]. Dostupné z: <http://trihybus.cz/>
- [19] Ballard 1MW ClearGen™ Fuel Cell System Begins Operation at Toyota Headquarters Campus. *PEM Fuel Cell Technology* [online]. Ballard Power Systems, © 2013 [cit. 2013-12-13]. Dostupné z: <http://www.ballard.com/about-ballard/newsroom/news-releases/news10171201.aspx>
- [20] SRINIVASAN, Supramaniam. *Fuel cells: From Fundamentals to Applications*. New York: Springer, 2006. ISBN 978-038-7251-165.
- [21] *Nexa™ Power Module User's Manual*. Ballard Power Systems, 16. 6. 2003.
- [22] *ThermaCAM™ E45: Uživatelská příručka*. FLIR Systems, 6. 2. 2006.

Seznam grafů

Graf 2.1: Polarizační charakteristika palivového článku typu PEM

Graf 2.2: Výkonová charakteristika PEMFC

Graf 4.1: Účinnost modulu Nexa

Graf 4.2: Výstupní napětí a proud modulu Nexa

Graf 4.3: Vlastní spotřeba modulu Nexa

Graf 4.4: Teploty při rostoucím zatížení

Graf 4.5: Napětí očistného článku

Graf 4.6: Spotřeba modulu při zátěži 1000 W

Graf 4.7: Teploty při zátěži 1000 W

Graf 4.8: Teploty modulu při zátěži 100 W

Graf 4.9: Teploty modulu při zátěži 300 W

Graf 4.10: Teploty modulu při zátěži 300 W bez chlazení

Graf 4.11: Teploty povrchu při různém zatížení

Graf 4.12: Spotřeba vodíku při různém zatížení

Seznam obrázků

- Obrázek 1.1: Šíření tepla vedením
- Obrázek 1.2: Šíření tepla volným a nuceným prouděním
- Obrázek 1.3: Elektromagnetické spektrum
- Obrázek 1.4: Znázornění Planckova a Wienova zákona
- Obrázek 1.5: Blokové schéma termokamery
- Obrázek 1.6: Oxidace povrchu materiálu
- Obrázek 2.1: Srovnání přímé a nepřímé přeměny chemické energie na elektrickou
- Obrázek 2.2: Konstrukce palivového článku PEM
- Obrázek 2.3: Deska s kanálky pro rozvod reakčních plynů
- Obrázek 2.4: Princip funkce PEMFC
- Obrázek 2.5: TriHyBus
- Obrázek 2.6: Největší elektrárna na světě využívající PEMFC
- Obrázek 3.1: Modul palivového článku NEXA Power
- Obrázek 3.2: Prostředí aplikace NexaMon
- Obrázek 3.3: Ukázka termogramu

Seznam tabulek

Tabulka 2.1: Přehled vlastností druhů palivových článků

Tabulka 2.2: Přehled hodnot Gibbsovy energie vody pro různé teploty

Tabulka 3.1: Parametry ThermaCAM E45

Tabulka 4.1: Účinnost při rostoucím zatížení

Tabulka 4.2: Vlastní spotřeba a naměřené teploty při rostoucím zatížení

Tabulka 4.3: Naměřené hodnoty při zatížení 1000 W

Tabulka 4.4: Naměřené hodnoty při zatížení 100 W bez chlazení

Tabulka 4.5: Naměřené hodnoty při zatížení 300 W

Tabulka 4.6: Naměřené hodnoty při zatížení 300 W bez chlazení

Seznam příloh

Příloha A: Termogram modulu při vnitřní teplotě 30 °C se zátěží 1000 W

Příloha B: Termogram modulu při vnitřní teplotě 35 °C se zátěží 1000 W

Příloha C: Termogram modulu při vnitřní teplotě 40 °C se zátěží 1000 W

Příloha D: Termogram modulu při vnitřní teplotě 45 °C se zátěží 1000 W

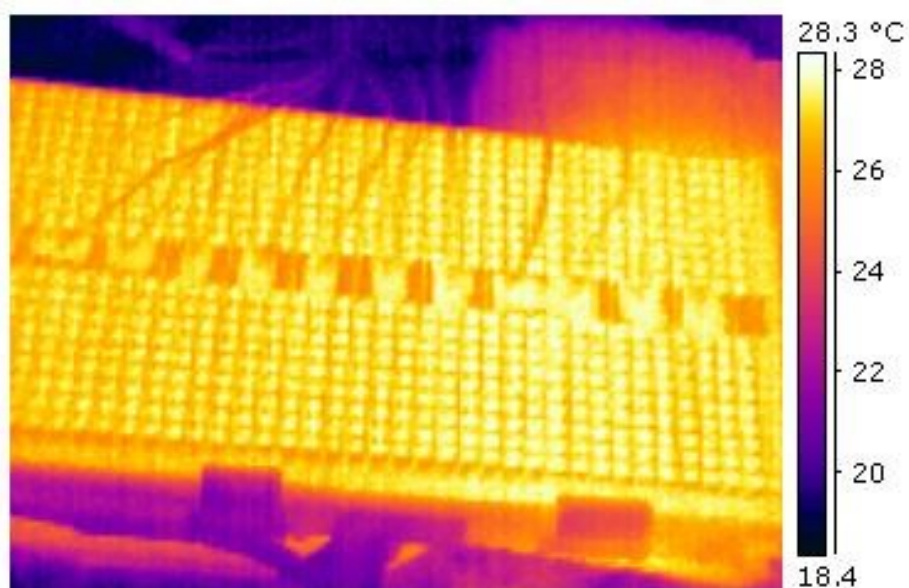
Příloha E: Termogram modulu při vnitřní teplotě 50 °C se zátěží 1000 W

Příloha F: Termogram modulu při vnitřní teplotě 55 °C se zátěží 1000 W

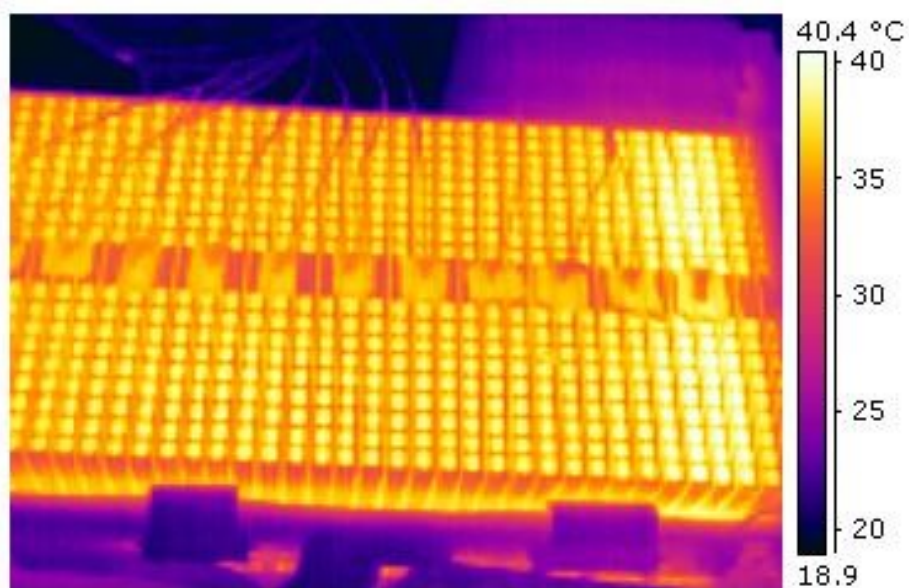
Příloha G: Termogram modulu při vnitřní teplotě 60 °C se zátěží 1000 W

Příloha H: Termogram modulu při vnitřní teplotě 65 °C se zátěží 1000 W

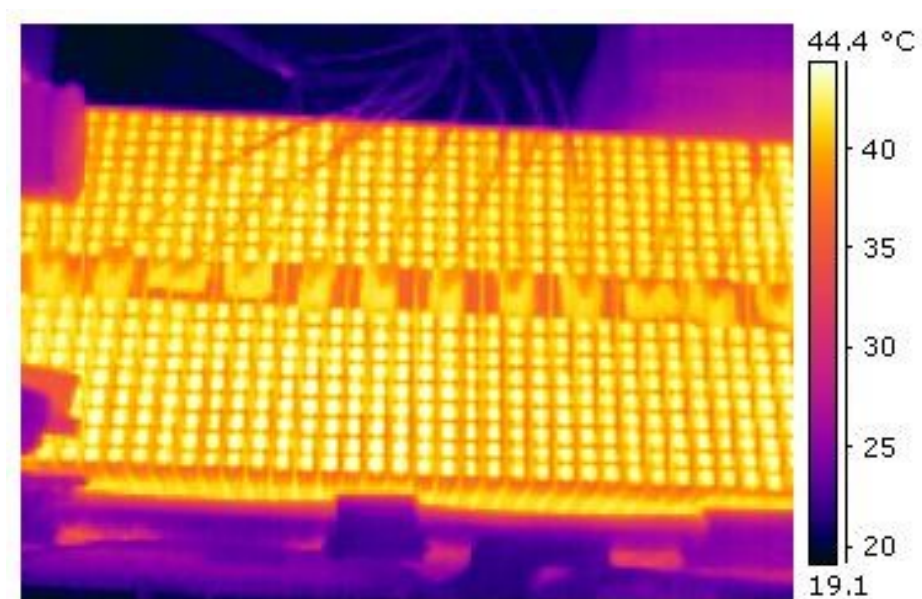
Příloha A: Termogram modulu při vnitřní teplotě 30 °C se zátěží 1000 W



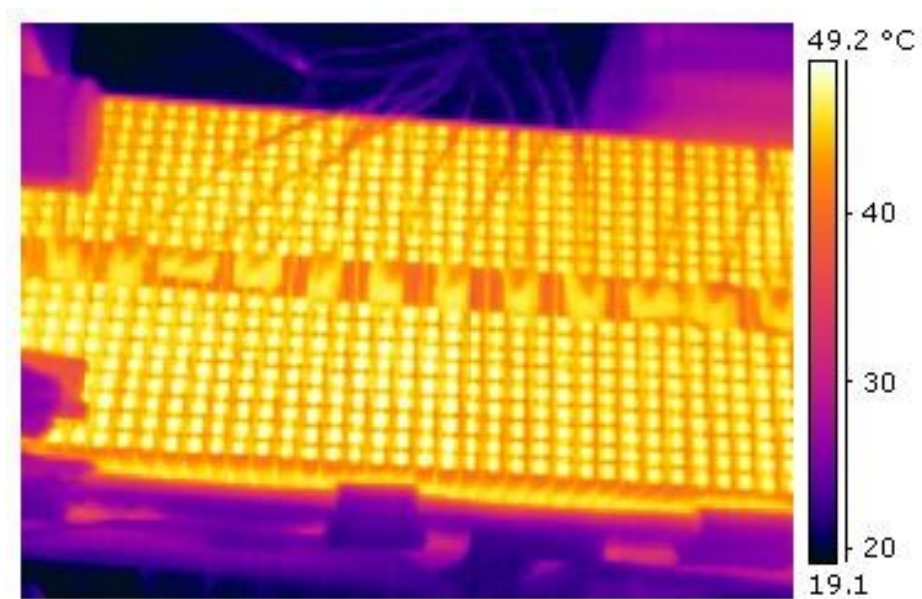
Příloha B: Termogram modulu při vnitřní teplotě 35 °C se zátěží 1000 W



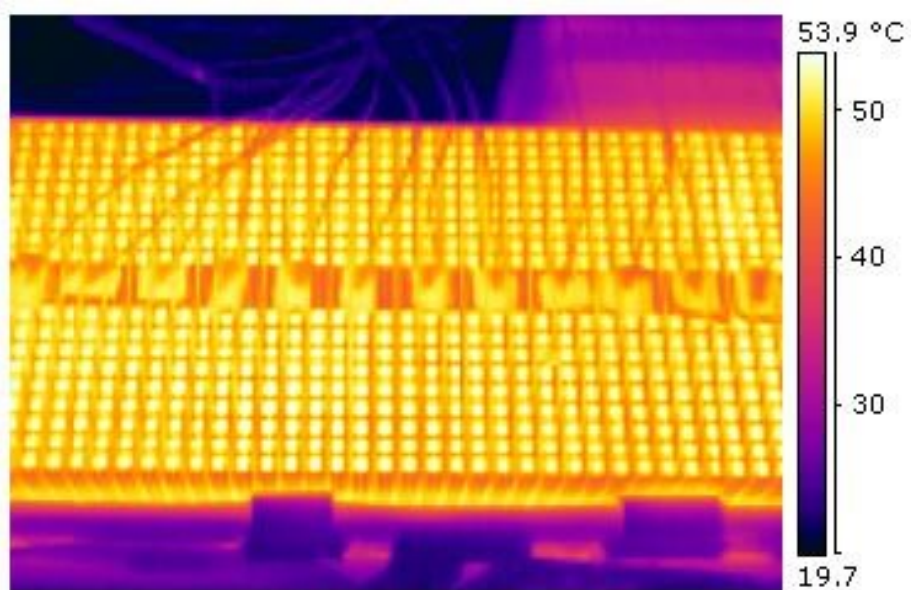
Příloha C: Termogram modulu při vnitřní teplotě 40 °C se zátěží 1000 W



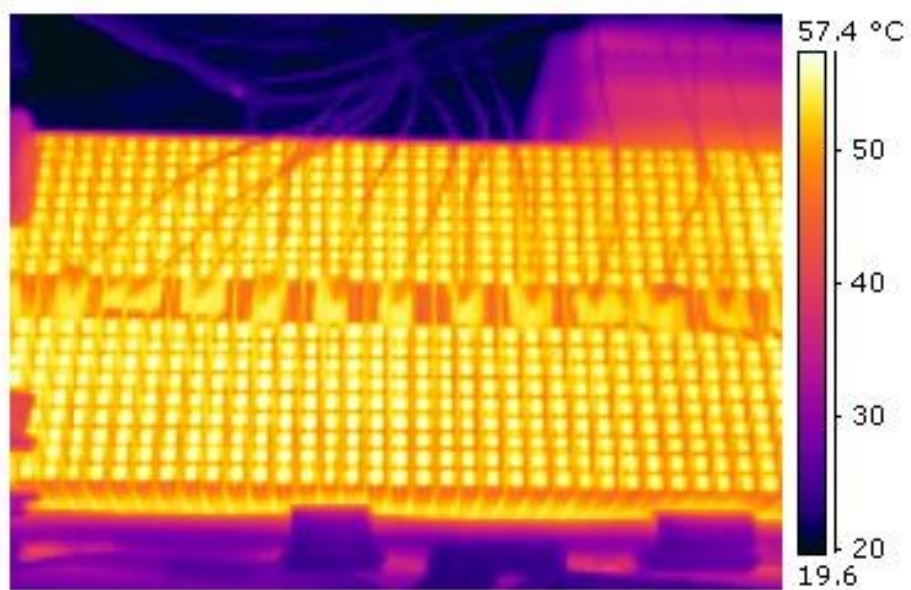
Příloha D: Termogram modulu při vnitřní teplotě 45 °C se zátěží 1000 W



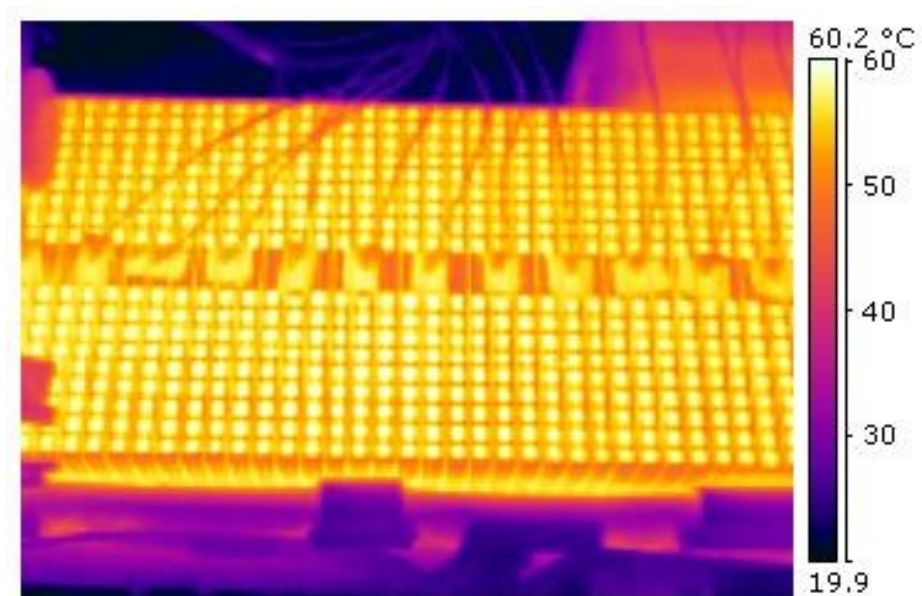
Příloha E: Termogram modulu při vnitřní teplotě 50 °C se zátěží 1000 W



Příloha F: Termogram modulu při vnitřní teplotě 55 °C se zátěží 1000 W



Příloha G: Termogram modulu při vnitřní teplotě 60 °C se zátěží 1000 W



Příloha H: Termogram modulu při vnitřní teplotě 65 °C se zátěží 1000 W

